

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ-
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Борулько Вячеслав Григорьевич,
доктор технических наук,
доцент

Москва - 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

_Тос209180446

Введение	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И РЕСУРСА РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМИ МЕТОДАМИ.....	10
1.1. Анализ условий работы и изнашивания рабочих органов почвообрабатывающих машин.....	10
1.2. Закономерности износа деталей машин: характер и интенсивность	12
1.3. Конструкционные материалы, используемые при производстве рабочих органов почвообрабатывающей техники.....	15
1.4. Технологии повышения износостойкости и ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин.....	21
1.5. Выводы по главе и постановка задач исследования.....	25
Глава 2. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛЕЙ	29
2.1 Влияние химического состава сталей на их износостойкость.....	29
2.2. Влияние термической обработки на механические свойства сталей (твердость, прочность и ударная вязкость)	38
2.3 Эксплуатационные факторы, влияющие на износ рабочих органов почвообрабатывающих машин.....	46
2.4 Обзор методов синтеза упрочняющих покрытий, напыляемых вакуумным методом.....	56
Выводы по главе 2.....	68
ГЛАВА 3. МАТЕРИАЛЫ, ПРОГРАММА И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ	72
3.1 Материалы исследования.....	72
3.2. Программа проведения испытаний	74

3.3 Методы термической обработки для упрочнения композитных материалов	76
3.4 Методика получения покрытия из нитрида титана	81
3.5 Методика проведения металлографического анализа	88
3.6 Методика определения микротвердости	95
3.7 Методика проведения качественного рентгеноструктурного анализа	110
3.8 Методика подготовки и исследования методом сканирующей электронной микроскопии	117
3.9 Методика оценки коррозионного износа	125
3.10 Методика проведения полевых испытаний	147
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	154
4.1 Результаты металлографического анализа	154
4.2 Анализ кинетики изменения микротвердости	158
4.3. Результаты рентгеноструктурного анализа	162
4.4 Результаты сканирующей электронной микроскопии	167
4.5. Результаты оценки коррозионной стойкости	174
4.6 Результаты полевых испытаний	182
4.7 Выводы по главе 4	187
ГЛАВА 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ	189
5.1. Разработка технологии изготовления плужного лемеха из стали Л53 с комплексным упрочнением	189
5.2. Исследование эксплуатационных свойств упрочненного лемеха	207
5.3. Экономическое обоснование внедрения технологии	210
5.4. Расчет экономического эффекта для хозяйства с парком 1000 плугов	216
5.5 Выводы по главе 5	220
Заключение	222
Список используемой литературы	224
Приложение 1	244

ВВЕДЕНИЕ

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 [34, 38,58].

По данным исследований, износ рабочих органов почвообрабатывающих машин приводит к значительным потерям в агропромышленном комплексе [77,80]. 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 [34, 74].

Интенсивный износ лемехов обусловлен следующими основными факторами: Абразивное воздействие почвы – частицы песка, глины и других твердых включений вызывают постепенное истирание поверхности металла [25, 86, 116]. Высокие динамические нагрузки – при контакте с плотными слоями почвы и каменистыми включениями возникают ударные нагрузки, приводящие к механическому разрушению рабочих кромок лемехов [58, 92, 93]. Коррозионное воздействие – в условиях повышенной влажности и агрессивной среды почвы происходит химическая коррозия, усугубляющая процесс износа [42, 107].

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 [20, 34, 74]. Кроме того, он оказывает влияние на экологическое состояние почвенных ресурсов [17].

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 [16, 70, 89]. Развитию именно этого направления и посвящена данная работа [16, 25, 64, 65, 70, 84].

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. и многие другие ученые [16, 17, 25, 34, 38, 45, 58, 69, 74, 77, 80, 84, 86, 90, 99].

Анализ литературных источников показал, что, несмотря на значительное количество исследований, направленных на повышение износостойкости [25, 28, 34, 38], 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 [34, 52, 69]. Существующие технологии упрочнения, восстановления и защиты поверхностей, такие как плазменная наплавка [16, 93], CVD-покрытия [32, 33, 35], электроискровая обработка [50, 51, 99] и фрикционное легирование [41, 66, 90], 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 [61, 64, 65, 79], показали значительный потенциал в достижении высокой прочности, однако зачастую сопровождаются недостаточной ударной

вязкостью [79], 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°С / 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.

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 Сармайт, 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 Сармайт 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 работы (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.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И РЕСУРСА РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН ИОННО- ПЛАЗМЕННЫМИ МЕТОДАМИ

1.1. Анализ условий работы и изнашивания рабочих органов почвообрабатывающих машин

Рабочие органы почвообрабатывающих машин, такие как лемехи плугов, диски луцильников и борон, стрельчатые лапы культиваторов, а также чизельные наконечники, в процессе работы подвергаются воздействию экстремально высоких механических, абразивных и коррозионных нагрузок. Они испытывают непрерывное абразивное трение о почвенную массу, значительные ударные нагрузки от скрытых в почве камней и других твердых включений, а также постоянное воздействие агрессивных почвенных электролитов и химикатов, что в совокупности приводит к их чрезвычайно быстрому износу и выходу из строя. В результате стремительного износа рабочих органов не только закономерно снижается общее качество обработки почвы, но и происходит существенное увеличение энергопотребления агрегатов, а также возникают значительные экономические потери, напрямую связанные с необходимостью частой замены изношенных деталей и узлов [57, 61].

Согласно данным Международной комиссии по сельскохозяйственной и биосистемной инженерии (CIGR), ежегодные совокупные экономические потери мирового агропромышленного комплекса от преждевременного выхода из строя рабочих органов почвообрабатывающих машин превышают колоссальную сумму в 2,3 миллиарда долларов США. Столь масштабные потери убедительно свидетельствуют о том, что одной из важнейших и наиболее приоритетных задач современного сельскохозяйственного машиностроения и агроинженерии является непрерывный поиск, активная

разработка и широкое внедрение высокоэффективных и экономически целесообразных методов повышения износостойкости и общего ресурса этих критически важных элементов почвообрабатывающей техники.

Условия работы рабочих органов определяются не только физико-механическими свойствами почвы (абразивность, влажность, плотность, каменистость), но и агротехнологическими параметрами — скоростью движения агрегата, глубиной обработки, углом атаки рабочего органа. Как показано в работе [58], взаимодействие рабочего органа с почвой носит сложный динамический характер, в котором сочетаются процессы резания, смятия, трения скольжения и удара. Особенно интенсивный износ наблюдается на режущих кромках и тыльных поверхностях, где происходит наибольший контакт с абразивными частицами [100, 101].

Теоретические основы трибологии и изнашивания деталей машин подробно изложены в работах [41, 86], где классифицируются основные виды износа: абразивный (доминирующий в почвенных условиях), адгезионный, коррозионно-механический и усталостный. В условиях сельскохозяйственной эксплуатации эти механизмы часто действуют совместно, усиливая разрушение материала. Например, коррозионные процессы, вызванные почвенными электролитами и удобрениями, ослабляют поверхностный слой, что ускоряет механический износ [42, 107].

Современные исследования [12, 25, 57, 64, 65, 79] подтверждают, что выбор материала и его структурное состояние играют решающую роль в долговечности рабочих органов. Особое внимание уделяется низколегированным сталям, в которых оптимизация содержания хрома, молибдена, бора и других элементов, а также термическая обработка (отпуск, закалка, вакуумный отжиг) позволяют достичь оптимального сочетания прочности, пластичности и износостойкости.

Перспективным направлением является применение методов поверхностного упрочнения. В работах [70, 76, 92, 93, 127-133] показано, что вакуумная термообработка, плазменная и порошковая наплавка, лазерное

упрочнение и CVD-покрытия позволяют многократно повысить стойкость рабочих поверхностей. Особенно эффективны комбинированные технологии, сочетающие термическую обработку с нанесением износостойких слоев [9, 23, 41, 43-48, 60, 71, 133].

Цифровизация и диагностика открывают новые возможности для прогнозирования износа. Программные продукты [36, 37] и методики диагностики [63] позволяют на основе статистической обработки профилей износа и анализа микроструктуры предсказывать остаточный ресурс деталей, что способствует переходу от планово-предупредительного ремонта к ресурсосберегающему обслуживанию [52, 77].

Таким образом, анализ условий работы и механизмов изнашивания рабочих органов почвообрабатывающих машин требует комплексного подхода, включающего:

- изучение трибологических и механических нагрузок в реальных условиях эксплуатации;
- выбор и разработку оптимальных материалов и сталей;
- применение современных технологий упрочнения;
- внедрение систем диагностики и прогнозирования ресурса.

Решение этих задач позволит не только снизить экономические потери, но и повысить эффективность сельскохозяйственного производства в целом, обеспечив устойчивое развитие агросектора в условиях растущих требований к ресурсосбережению и экологической безопасности.

1.2. Закономерности износа деталей машин: характер и интенсивность

Процесс изнашивания рабочих органов почвообрабатывающих машин носит строго закономерный характер и определяется совокупностью факторов: физико-механическими свойствами обрабатываемой почвы, режимами работы агрегата, конструкцией детали, материалом и методами его

упрочнения. Характер износа — это качественная сторона процесса, отражающая механизм разрушения поверхности (абразивный, коррозионный, усталостный и др.), а интенсивность — количественная мера, показывающая скорость потери массы или размеров детали за единицу времени или на единицу выполненной работы [41, 86].

Наиболее распространённым и разрушительным для почвообрабатывающих органов является абразивный износ, вызванный трением о твёрдые частицы почвы (кварц, полевой шпат, кремнь). Его интенсивность зависит от гранулометрического состава почвы, влажности, скорости движения агрегата и угла атаки рабочего органа [100, 101, 103]. Особенно высока интенсивность износа в засушливых регионах, где содержание абразивных частиц достигает 60–80% [92, 108].

Вторым по значимости является коррозионно-механический износ, усиливающийся при обработке почв, насыщенных минеральными удобрениями, пестицидами и органическими кислотами. Коррозия ослабляет поверхностный слой металла, что ускоряет его механическое разрушение [42, 107]. В условиях повышенной влажности и при использовании агрессивных химикатов интенсивность износа может возрасть в 1,5–2 раза [28, 110].

Также значим ударно-абразивный износ, характерный для чизельных лап и глубокорыхлителей, сталкивающихся с камнями и корневищами. В этом случае разрушение поверхности происходит не только за счёт трения, но и за счёт микроскола и пластической деформации [104, 116].

Закономерности износа конкретных деталей хорошо документированы в работах отечественных исследователей. Так, в публикации Ерохина М.Н. [29] приведена детальная классификация видов износа для основных рабочих органов, которая систематизирована в таблице 1.1.

Анализ таблицы 1.1 показывает, что износ носит локальный и неравномерный характер: наибольшие потери материала происходят на режущих кромках, носовых частях и зонах контакта с наиболее абразивными слоями почвы. Например, у лемеха плуга износ по высоте носка приводит к

снижению глубины обработки, а износ по толщине — к потере остроты и увеличению тягового сопротивления [28, 38].

Таблица 1.1 – Виды износов рабочих органов почвообрабатывающих машин [16]

Деталь	Вид износа
Лемех плуга	линейный износ по высоте носка
	линейный износ по ширине детали
	износ лезвия по толщине
Отвал	сквозное протираание в зоне стыка отвала с лемехом
	износ головки крепежного болта
	износ полевого обреза
Полевая доска	износ пятки
	износ нижней части
Лапа культиватора	линейный износ носовой части
	линейный износ крыльев лапы по ширине
	увеличение толщины лезвия до предельной величины
Дисковые рабочие органы	радиальный износ по диаметру
	затупление лезвия

Интенсивность износа может варьироваться в широких пределах. Так, по данным [25, 34], при обработке тяжёлых почв без защитных покрытий линейный износ лемеха может достигать 0,8–1,2 мм за 10 га, что приводит к выходу детали из строя уже после 40–60 га обработки. Применение упрочнённых сталей [57, 61, 64, 65] или покрытий (CVD, плазменная наплавка, вакуумная термообработка) [25, 33, 70, 84, 92, 93, 127-133] позволяет снизить интенсивность износа в 3–5 раз.

Цифровые методы диагностики и прогнозирования, разработанные в работах [36, 37, 63], позволяют не только фиксировать текущие параметры износа, но и строить прогнозы остаточного ресурса, что особенно важно для перехода к ресурсосберегающим технологиям обслуживания [52, 77].

Таким образом, закономерности износа рабочих органов почвообрабатывающих машин определяются:

характером — преобладанием абразивного и коррозионно-механического износа с локализацией в зонах максимального контакта с почвой;

интенсивностью — зависящей от условий эксплуатации, материала и технологии упрочнения, варьирующей от долей миллиметра до нескольких миллиметров на 10–50 га обработки.

Понимание этих закономерностей позволяет целенаправленно разрабатывать меры по повышению долговечности деталей — от выбора оптимальных марок сталей до внедрения инновационных покрытий и систем мониторинга износа в реальном времени.

1.3. Конструкционные материалы, используемые при производстве рабочих органов почвообрабатывающей техники

Выбор конструкционных материалов для изготовления рабочих органов почвообрабатывающих машин — таких как лемехи плугов, отвалы, диски борон и луцильников, стрелчатые лапы культиваторов, чизельные наконечники и полевые доски — представляет собой фундаментальную инженерную задачу, от решения которой напрямую зависят не только долговечность и надёжность этих элементов, но и общая эффективность агротехнологического процесса, энергозатраты, качество обработки почвы и экономические показатели сельскохозяйственного производства. Условия эксплуатации рабочих органов чрезвычайно агрессивны: они подвергаются постоянному абразивному воздействию почвенных частиц (в первую очередь кварца, кремнезёма, полевого шпата, твёрдость которых по шкале Мооса достигает 7 единиц), ударным нагрузкам от скрытых в почве камней и корневищ, а также коррозионному разрушению под действием влаги, минеральных удобрений (азотных, фосфорных, калийных), пестицидов и органических кислот, выделяемых растительными остатками. В совокупности эти факторы создают уникальную трибологическую среду, в которой интенсивность износа может в десятки раз превышать аналогичные показатели в других отраслях машиностроения [25, 42, 86, 100, 101, 103].

В связи с этим к материалам предъявляются повышенные требования: они должны обладать не только высокой поверхностной твёрдостью (для

сопротивления абразивному износу), но и достаточной ударной вязкостью (для предотвращения хрупкого разрушения при ударах), хорошей прокаливаемостью (для обеспечения равномерной структуры по сечению), коррозионной стойкостью (для работы в агрессивных химических средах), а также технологичностью в обработке. Кроме того, важнейшим критерием остаётся стоимость материала и его доступность, поскольку рабочие органы — это быстроизнашивающиеся детали, требующие регулярной замены, и их чрезмерное удорожание делает технологию экономически нецелесообразной [28, 38, 58, 77].

Исторически сложилось, что основным конструкционным материалом для изготовления рабочих органов являлись углеродистые стали обыкновенного качества — такие как Ст3, Ст5, а также качественные конструкционные стали типа 45, 50, 60, 65Г. Эти материалы широко применялись благодаря своей доступности, хорошей обрабатываемости и удовлетворительным механическим свойствам после термической обработки (закалка + отпуск). Однако при интенсивной эксплуатации, особенно на тяжёлых, каменистых или песчаных почвах, их ресурс оказывался недостаточным — лемех мог выходить из строя уже после обработки 30–50 гектаров, что требовало замены и увеличивало эксплуатационные расходы [28, 38, 101]. В работах Ерохина М.Н. и Новикова В.С. [28, 38] показано, что даже при оптимальной термообработке стали 65Г и 60С2 не обеспечивают необходимого уровня износостойкости для современных условий, особенно при использовании высокоскоростных агрегатов и глубокой обработки.

Для повышения характеристик в середине XX века начали применяться легированные стали, такие как 9ХС, 75ХМ, 30ХГСА, 40ХФА и другие. Легирование хромом, кремнием, марганцем, ванадием и молибденом позволяло повысить прокаливаемость, улучшить структуру и увеличить твёрдость после закалки. Стоимость таких сталей была выше, а эффект от их применения не всегда оправдывал затраты, особенно в условиях массового производства. Тем не менее, именно на базе легированных сталей начали

разрабатываться специализированные марки, адаптированные именно для почвообрабатывающих органов. Например, сталь марки Л-53, разработанная в СССР и до сих пор применяемая в России, стала одной из первых сталей, специально созданных для лемехов. Её химический состав и режимы термообработки оптимизированы для сочетания высокой поверхностной твёрдости (до 50–55 HRC) с достаточной вязкостью сердцевины [70, 127].

Современный этап развития материаловедения в агроинженерии характеризуется переходом к высокопрочным низколегированным сталям, в которых достигается максимальная эффективность за счёт точного управления микроструктурой, фазовым составом и распределением легирующих элементов. В серии работ Мишнева Р.В., Борисовой Ю.И., Ерохина М.Н. и др. [12, 57, 64, 65, 79] исследовано влияние таких элементов, как хром, молибден, бор, никель и ванадий, на формирование структуры стали. Показано, что даже незначительное легирование бором (0,001–0,005%) резко повышает прокаливаемость, а молибден и хром способствуют образованию мелкодисперсных карбидов, упрочняющих матрицу. Особенно важную роль играет остаточный аустенит — в работах [7, 55] доказано, что его оптимальное содержание (5–15%) повышает не только прочность, но и пластичность, предотвращая хрупкое разрушение при ударных нагрузках.

Патенты [61, 64, 65], принадлежащие коллективу учёных РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, защищают конкретные составы сталей и режимы их термообработки, обеспечивающие уникальное сочетание свойств. Например, в патенте [65] описан способ изготовления заготовки режущего инструмента из стали, содержащей 0,30–0,40% углерода, 0,8–1,2% хрома, 0,2–0,4% молибдена и 0,002–0,008% бора, с последующей закалкой от 900–950°C и низким отпускком при 180–220°C. Такая сталь демонстрирует предел прочности до 1800 МПа и износостойкость в 3–4 раза выше, чем у стали 65Г.

Особое внимание в последнее десятилетие уделяется вакуумной термообработке как методу повышения качества поверхности и структуры. Исследования Бадекина М.Ю., Борулько В.Г., Балабанова В.И. и др. [70, 127-

132] показали, что вакуумный отжиг и закалка позволяют исключить окисление и обезуглероживание поверхности, снизить остаточные напряжения, получить более однородную структуру и повысить микротвёрдость на 15–25%. В работе [128] приведены данные по микроструктуре стали Л-53 после вакуумной обработки: наблюдается равномерное распределение мартенсита с включениями остаточного аустенита и мелких карбидов, что обеспечивает оптимальный баланс твёрдости и вязкости. В [129] разработана физико-математическая модель абразивного износа сормайтových наплавов после вакуумной термообработки, позволяющая рассчитывать скорость износа в зависимости от нагрузки, скорости и гранулометрического состава почвы. В [130] экспериментально оптимизированы режимы вакуумного отжига (температура 720–760°C, выдержка 2–3 часа, скорость охлаждения 10–15°C/мин), обеспечивающие максимальную износостойкость при сохранении пластичности.

Параллельно с совершенствованием базовых материалов активно развиваются технологии нанесения износостойких покрытий и наплавов. Это позволяет использовать в качестве основы относительно дешёвые и технологичные стали, а износостойкость обеспечивать за счёт поверхностного слоя. Наиболее распространены:

- Плазменная и порошковая наплавка — применяется для восстановления и упрочнения лемехов, дисков и лап. В работах Дидманидзе О.Н. [16], Щицына В.Ю. и др. [92, 93], Слинко Д.Б. и др. [76] показано, что наплавка сплавами типа «Сормайт», содержащими карбиды вольфрама, хрома и бора, увеличивает ресурс в 3–5 раз. Особенно эффективна наплавка током обратной полярности, создающая остаточные напряжения [92, 93].

- CVD-метод (химическое парофазное осаждение) — позволяет получать тонкие (5–30 мкм), но крайне твёрдые (до 2000–3000 HV) покрытия на основе карбида хрома. Серия работ Ерохина М.Н. и соавт. [23, 27–35] посвящена управлению процессом осаждения, изучению адгезии покрытий к подложке, влиянию технологических параметров на износостойкость.

Показано, что такие покрытия эффективны не только для прецизионных деталей, но и для рабочих органов — в [34] предложена методика прогнозирования долговечности лемехов с CVD-покрытием на стадии проектирования.

- Электроискровое легирование и диффузионная металлизация — методы, разработанные и глубоко исследованные Бугаевым В.Н., Казанцевым С.П., Кравченко И.Н. и др. [9, 23, 31, 41, 43-51, 60, 71, 99]. Позволяют формировать диффузионные слои железоборидов, хромидов, карбидов толщиной 20–100 мкм с высокой твёрдостью (до 1500–1800 HV) и хорошей адгезией. Преимущество — минимальное термическое воздействие на основной металл, что особенно важно для тонкостенных деталей. В [44, 45] Казанцев С.П. разработал комбинированную технологию, сочетающую термодиффузионное насыщение и последующую наплавку, что позволило увеличить ресурс лемехов в 6–8 раз.

- Лазерное упрочнение и наплавка — перспективное направление, позволяющее локально изменять структуру поверхности. В [84] исследованы керамические покрытия на основе бора, нанесённые короткоимпульсной лазерной наплавкой, с твёрдостью до 2200 HV и отличной стойкостью к абразивному износу. В [113] показано, что лазерная наплавка композиций Ni60A/Cr3C2 на сталь 60C2Mn повышает износостойкость в 4,5 раза.

Не менее важным направлением является применение наноматериалов и нанотехнологий. В диссертации Федотова А.В. [83] рассмотрено использование наноструктурного оксигидроксида алюминия в качестве модификатора структуры и триботехнической добавки. В [9, 27, 62] показано, что наночастицы TiO_2 , ZnO , Al_2O_3 , вводимые в покрытия или смазочные материалы, снижают коэффициент трения и интенсивность износа. Патент [62] защищает композиционный материал на основе полиуретана, армированного наночастицами, для изготовления износостойких диафрагм — аналогичные технологии можно адаптировать для металлических деталей.

Зарубежные исследования подтверждают и дополняют отечественные наработки. В работах [103, 104, 110, 116, 118] детально изучено поведение сталей типа 27MnB5, 30MnB5, 22MnCrB5 — стандартных для европейского сельхозмашиностроения. Показано, что после борирования или карбонитрирования они демонстрируют высокую стойкость к абразивному износу благодаря образованию поверхностного слоя боридов железа толщиной 50–150 мкм. В [105, 115, 121] исследованы HVOF-покрытия на основе WC-Co-Cr, нанесённые на стальные подложки, — такие покрытия обладают исключительной твёрдостью (до 1400–1600 HV) и низким коэффициентом абразивного износа. В [118] показано, что карбонитрированные лемехи из стали 30MnB5 сохраняют работоспособность в 5–7 раз дольше, чем из углеродистой стали.

Таким образом, современный ассортимент конструкционных материалов для рабочих органов почвообрабатывающих машин представляет собой многоуровневую систему, включающую:

- базовые конструкционные стали (углеродистые и низколегированные) — для экономичных решений и массового производства;
- специализированные высокопрочные стали (типа Л-53, патентные составы) — для ответственных деталей и интенсивных условий;
- композитные материалы и наплавки (Сормайты, карбиды вольфрама/хрома/бора) — для локального упрочнения;
- функциональные покрытия (CVD, PVD, лазерные, HVOF, электроискровые) — для достижения максимальной износостойкости;
- наномодифицированные материалы и добавки — для создания «умных» поверхностей с заданными триботехническими свойствами.

Наиболее эффективным и экономически оправданным подходом в современной практике является комбинированное решение: использование доступной конструкционной стали в качестве основы и нанесение на критические зоны (режущие кромки, носки, полевые обрезы) износостойких покрытий или наплавов. Такой подход позволяет достичь оптимального

баланса между стоимостью, технологичностью и долговечностью, что важно в условиях рыночной экономики и конкуренции в агросекторе [52, 77, 80, 89].

1.4. Технологии повышения износостойкости и ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин

В мировой и отечественной агроинженерной практике сложился устойчивый арсенал методов и технологических решений, направленных на повышение износостойкости и продление ресурса деталей машин; наиболее значимые из них обобщены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Методы повышения износостойкости и ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин

Наименование групп методов	Конкретные методы
Термическая, химико-термическая, термодиффузионная обработка	Объемная закалка – отпуск, Поверхностная закалка (ТВЧ, пламенная), Цементация, Азотирование (газовое, ионное), Цианирование, Борирование, Диффузионная металлизация (хромирование, алитирование)
Наплавка на более изнашиваемые участки износостойкого слоя	Ручная электродуговая наплавка, Автоматическая и механизированная наплавка под флюсом, в среде защитных газов, Индукционная наплавка, Плазменная наплавка, Лазерная наплавка, Электрошлаковая наплавка, Контактная наварка ленты
Газотермическое напыление износостойких покрытий	Газопламенное (flame spraying) напыление, Электродуговое напыление (arc spraying), Плазменное напыление (plasma spraying), Детонационное напыление, Высокоскоростное газопламенное напыление (HVOF)
Закрепление накладных износостойких элементов	Механическое крепление пластин из износостойкой стали, Приварка пластин и накладок, Наклепывание, Пайка твердыми припоями, Крепление элементов из технической керамики
Нанесение композиционных покрытий, армирующих валиков	Нанесение клеевых и эпоксидных составов, наполненных зернами кварца, корунда, карбида кремния, Наплавка армирующих валиков из твердых сплавов

Одним из наиболее перспективных и динамично развивающихся направлений в решении этой сложной задачи является нанесение тонких и сверхтвердых защитных покрытий с использованием передовых технологий поверхностной инженерии, таких как ионно-плазменные методы (PVD - Physical Vapor Deposition) и химическое осаждение из паровой фазы (CVD - Chemical Vapor Deposition) [50, 51]. Эти высокотехнологичные методы позволяют целенаправленно создавать покрытия с контролируемой наноструктурой, уникальным фазовым составом и градиентными свойствами, способными в несколько раз повышать износостойкость, снижать коэффициент трения и значительно продлевать срок службы важных рабочих органов, не изменяя свойств основного материала подложки [52, 86].

Значительный вклад в развитие технологии поверхностной инженерии и ионно-плазменных методов внесли многие выдающиеся ученые и исследователи. Среди них особенно следует отметить:

Д. Мэттокс – один из ключевых разработчиков и пионеров в исследовании процессов осаждения из паровой фазы, включая магнетронное распыление и ионную имплантацию.

С. Вепрек – один из основоположников в области разработки и глубокого изучения сверхтвердых нанокompозитных покрытий, особенно систем типа nc-TiN/a-Si₃N₄ и других. Его фундаментальные работы заложили основу для создания новых классов материалов с уникальными свойствами.

О.В. Соболев является автором основополагающих работ в области создания катодно-дуговых PVD-покрытий с управляемой микроструктурой и разработки сверхтвёрдых нанокompозитных систем, таких как Ti-TiN-(Ti,Al)N. Его значительный вклад включает детальное исследование влияния плазменной предобработки на адгезионные свойства покрытий.

В.С. Левченко – известный разработчик HIPIMS-технологий (High Power Impulse Magnetron Sputtering), градиентных износостойких покрытий и исследований термоциклической устойчивости CVD-покрытий.

И.И. Муслин – создатель многофункциональных алмазоподобных (DLC) покрытий и инновационных трибологических композиций для работы в экстремальных условиях эксплуатации.

Эти и многие другие ученые внесли неоценимый вклад в развитие технологии поверхностной инженерии, которая открывает новые горизонты и предоставляет принципиально новые возможности в области повышения долговечности сельскохозяйственной техники [41, 63].

Проблема износа плужных лемехов продолжает оставаться одной из наиболее серьезных и экономически значимых проблем в сельскохозяйственной отрасли, поскольку их интенсивный износ существенно и напрямую ухудшает качество обработки почвы, приводит к резкому увеличению расходов на эксплуатацию и техническое обслуживание техники, а также ведет к избыточному и нерациональному потреблению топлива. В связи с этим современные аграрии и производители техники активно ищут и внедряют инновационные способы продления срока службы рабочих органов почвообрабатывающих орудий. На сегодняшний день широко применяются и продолжают развиваться разнообразные методики противостояния износу лемехов, среди которых наиболее эффективными и перспективными являются [36, 37]:

- Разработка и применение материалов и легирующих добавок для сталей, улучшающих физические и химические свойства материала;

- Использование инновационных видов термической и термомеханической обработки, направленной на формирование заданной внутренней структуры металла;

- Наплавка твердых сплавов и нанесение износостойких покрытий методами наплавки, создающие дополнительный защитный слой на поверхности;

- Применение высокотехнологичных ионно-плазменных (PVD, CVD) и лазерных технологий, предназначенных для модификации и упрочнения поверхностных слоёв металла;

— Комбинированные гибридные подходы, интегрирующие и синергетически объединяющие несколько технологий для достижения максимального эффекта.

Проводя сравнительный анализ различных вариантов покрытий (табл. 1.3), особое внимание исследователей и инженеров заслуживает нитрид титана (TiN). Этот материал обладает поистине уникальным комплексом трибологических показателей: исключительно высокое соотношение Н/Е (твердость/модуль упругости) в диапазоне 0.10-0.12, что делает его устойчивым к пластическим деформациям; оптимальный коэффициент трения (0.4-0.6), идеально подходящий для работы в условиях почвенной среды; и увеличенная в 3-5 раз износостойкость по сравнению с обычной закаленной сталью [41, 90]. К тому же, TiN может относительно легко осаждаться на детали сложной геометрической формы при сравнительно низких температурах (300-450°C), что позволяет полностью сохранить исходную структуру и свойства стали-подложки, а его промышленное производство является хорошо отработанным и обходится сравнительно недорого, обеспечивая высокую экономическую эффективность.

Таблица 1.3 – Сравнительные характеристики защитных покрытий

Покрытие	Твердость, HV	Коэффициент трения	Термостойкость, °C	Относительная износостойкость
TiN	2400-2800	0.4-0.6	600	3.0-5.0
TiAlN	2800-3200	0.5-0.7	800	3.5-5.5
CrN	1800-2200	0.5-0.7	700	2.5-4.0
DLC	2500-4000	0.1-0.3	400	2.0-3.5

При сравнении хорошо видно, что покрытия на основе TiAlN, как правило, дороже на 30-40%, при том, что практическая разница в износостойкости в условиях абразивного износа почвой не является столь значительной. Алмазоподобные углеродные покрытия (DLC) часто страдают от ограниченной термостойкости и плохой адгезии к стальной основе, особенно при ударных нагрузках. Толстые CVD-покрытия, в свою очередь, склонны к образованию остаточных напряжений растяжения и могут

растрескиваться при изгибе и ударе. В итоге, именно покрытие TiN по совокупности эксплуатационных, технологических и экономических параметров становится оптимальным выбором, что делает его бесспорным лидером для широкого промышленного применения в машиностроительной индустрии сельского хозяйства [56, 87].

1.5. Выводы по главе и постановка задач исследования

Проведённый в первой главе комплексный анализ условий работы, закономерностей изнашивания, конструкционных материалов и технологий упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин позволил сформулировать следующие ключевые выводы.

Во-первых, условия эксплуатации рабочих органов (лемехов, дисков, лап, отвалов и др.) являются чрезвычайно агрессивными и многокомпонентными. Они включают в себя не только абразивное воздействие почвенных частиц (особенно кварца и кремнезёма, обладающих высокой твёрдостью), но и ударные нагрузки от камней, коррозионное разрушение под действием удобрений и органических кислот, а также циклические механические напряжения. Совокупность этих факторов приводит к быстрому выходу деталей из строя, снижению качества обработки почвы, росту энергозатрат и значительным экономическим потерям — по оценкам CIGR, более 2,3 млрд долларов ежегодно в мировом масштабе [57, 61]. Это делает проблему изнашивания не просто технической, а стратегически важной для всего агропромышленного комплекса.

Во-вторых, характер и интенсивность износа носят строго закономерный и предсказуемый характер. Доминирующим механизмом является абразивный износ, локализованный на режущих кромках, носках и полевых обрезках, где концентрируются наибольшие нагрузки [41, 86, 101, 102]. Коррозионно-механический и ударно-абразивный износ усиливают разрушение, особенно в условиях повышенной влажности и при обработке тяжёлых почв [42, 107, 108]. Интенсивность износа может варьироваться от

0,8 до 1,2 мм на 10 га обработки для неупрочнённых сталей, что приводит к замене лемеха уже после 40–60 га. Однако применение современных материалов и технологий позволяет снизить скорость износа в 3–5 раз, а в отдельных случаях — в 6–8 раз [25, 34, 44, 45, 65, 129].

В-третьих, выбор конструкционного материала является фундаментальным фактором, определяющим ресурс рабочего органа. Традиционные углеродистые стали (Ст3, 65Г, 60С2) не обеспечивают требуемой долговечности в современных условиях. На смену им приходят высокопрочные низколегированные стали с оптимизированным составом (хром, молибден, бор, ванадий) и контролируемой микроструктурой, включая остаточный аустенит, повышающий пластичность без потери прочности [12, 57, 64, 65, 79]. Особое значение имеет сталь марки Л-53, свойства которой после вакуумной термообработки позволяют достичь оптимального баланса твёрдости и вязкости [70, 127-130]. Патенты [61, 64, 65] подтверждают научно-техническую зрелость этого направления и его промышленную применимость.

В-четвёртых, технологии поверхностного упрочнения играют решающую роль в продлении срока службы. Наиболее эффективными признаны: CVD- и PVD-покрытия (особенно на основе TiN), сочетающие высокую твёрдость (до 2800 HV), низкий коэффициент трения (0,4–0,6) и хорошую адгезию к подложке [27-35, 41, 50-52, 56, 86, 87, 90]; плазменная и лазерная наплавка сплавами типа «Сормайт» или Ni-Cr-C, позволяющая локально повысить износостойкость в 3–5 раз [16, 76, 84, 92, 93, 113]; электроискровое легирование и диффузионная металлизация, формирующие тонкие, но крайне твёрдые слои боридов и карбидов без термического перегрева основного металла [9, 23, 31, 41, 43-48, 50, 51, 60, 71, 99]; вакуумная термообработка, исключая окисление и обезуглероживание, снижающая остаточные напряжения и повышающая микротвёрдость на 15–25% [70, 127-132].

Особо следует отметить покрытия на основе нитрида титана (TiN), которые по совокупности эксплуатационных, технологических и экономических параметров признаны наиболее сбалансированными и перспективными для массового применения в сельхозмашиностроении. Они превосходят по износостойкости обычную сталь в 3–5 раз, легко наносятся на детали сложной формы, не деформируют подложку и обладают приемлемой стоимостью [41, 56, 87, 90].

В-пятых, цифровизация и диагностика открывают новые горизонты в управлении износом. Программные продукты [36, 37] и методики диагностики [63] позволяют не только фиксировать текущее состояние деталей, но и прогнозировать остаточный ресурс, переходя от реактивного ремонта к превентивному и ресурсосберегающему обслуживанию [52, 77]. Это особенно важно в условиях цифровой трансформации агропромышленного комплекса.

Наконец, комплексный подход — сочетающий оптимальный выбор базового материала, применение передовых методов упрочнения, внедрение систем мониторинга и прогнозирования — является единственно эффективной стратегией в борьбе с износом. Ни один из методов, применяемый изолированно, не способен решить проблему в полной мере. Только синергия материаловедения, трибологии, поверхностной инженерии и цифровых технологий позволяет достичь максимального эффекта.

Таким образом, результаты анализа, проведённого в первой главе, свидетельствуют о том, что повышение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин — это многомерная задача, требующая системного, научно обоснованного и технологического решения. Полученные выводы создают прочную теоретическую и практическую основу для разработки новых методов упрочнения, в том числе с применением наноструктурированных покрытий и гибридных технологий, что и будет реализовано в последующих главах настоящей работы.

Исходя из сформулированной цели, для ее достижения необходимо решить следующие конкретные задачи:

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°С / 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.

ГЛАВА 2. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛЕЙ

2.1 Влияние химического состава сталей на их износостойкость

Износостойкость сталей является одним из ключевых показателей, определяющих их эксплуатационные характеристики в условиях интенсивного механического, термического и коррозионного воздействия. В промышленности, особенно в тяжелом машиностроении, энергетике, горнодобывающей и транспортной отраслях, требования к долговечности и надежности конструкционных материалов постоянно растут. Одним из факторов, определяющих износостойкость сталей, является их химический состав, влияющий напрямую на микроструктуру, твердость, прочность и ударную вязкость [12]. Эти свойства определяют способность материала противостоять различным видам износа — абразивному, адгезионному, усталостному и коррозионно-механическому. Понимание взаимосвязи между химическим составом и эксплуатационными характеристиками позволяет оптимизировать выбор материалов и разрабатывать новые композиционные системы, такие как сталь Л53 с наплавкой Сармайт, находящие применение в условиях экстремальных нагрузок [16, 80].

Химический состав стали оказывает определяющее влияние на формирование ее микроструктуры, а следовательно, и на механические свойства. Основными легирующими элементами, используемыми для повышения износостойкости, являются углерод (C), марганец (Mn), хром (Cr), молибден (Mo), ванадий (V), никель (Ni) и кремний (Si). Углерод является наиболее важным элементом, поскольку он способствует образованию карбидов и увеличивает твердость за счет образования мартенсита при закалке. Однако чрезмерное содержание углерода может привести к снижению пластичности и ударной вязкости, что делает материал более

склонным к хрупкому разрушению. Оптимальное содержание углерода в конструкционных сталях обычно лежит в диапазоне 0,2–0,6 мас.%, при этом для износостойких сталей оно может достигать 1,0 мас.% и выше [12, 25].

Уравнение Холла-Петча, описывающее зависимость предела текучести от размера зерна, имеет вид:

$$S_y = S_0 + \frac{k_d}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

где S_y — предел текучести, S_0 — константа, характеризующая сопротивление решетки, k_d — коэффициент, зависящий от материала, а d — средний размер зерна.

Это уравнение показывает, что уменьшение размера зерна (мельчение структуры) приводит к увеличению прочности, что достигается как за счет легирования, так и за счет термомеханической обработки [104]. В свою очередь, легирование хромом (Cr) способствует повышению твердости и коррозионной стойкости за счет образования твердых карбидов Cr_7C_3 и Cr_{23}C_6 , а также за счет упрочнения твердого раствора [25]. Хром в концентрации 12–30 мас.% используется в нержавеющей и износостойких сталях, обеспечивая высокую стойкость к абразивному износу. Молибден и ванадий способствуют дисперсионному твердению за счет образования мелкодисперсных карбидов (Mo_2C , VC), препятствующих движению дислокаций и росту зерна при высоких температурах [12].

Особое внимание в последние годы уделяется разработке композиционных систем, в которых основной материал (например, сталь) сочетается с износостойким покрытием, нанесенным методом наплавки [16]. Такие системы позволяют достичь оптимального сочетания прочности основы и высокой износостойкости поверхности. Одним из перспективных решений является использование литой стали Л53 с наплавкой на основе Сармайта — сплава, содержащего высокое количество хрома, вольфрама и карбидообразующих элементов. Сталь Л53 относится к классу низколегированных конструкционных сталей, предназначенных для работы в

условиях динамических нагрузок [28, 38]. Ее химический состав включает около 0,45–0,55% С, 0,60–0,90% Мп, до 0,40% Si, а также небольшие добавки Cr, Ni и Mo. Такой состав обеспечивает высокую прочность и достаточную ударную вязкость, что делает Л53 подходящим материалом для деталей, подвергающихся ударным и циклическим нагрузкам. Однако при эксплуатации в абразивных средах поверхность Л53 подвержена интенсивному износу, что ограничивает срок службы деталей. Для решения этой проблемы применяется наплавка износостойких материалов, среди которых особое место занимает Сармайт [16].

Сармайт — это группа наплавочных сплавов, разработанных для повышения износостойкости сталей в условиях абразивного и ударно-абразивного износа. Основу Сармайта составляют высокохромистые сплавы с содержанием Cr до 30%, С до 3,5%, а также W, Nb и V, способствующие образованию вторичных карбидов. Микроструктура наплавленного слоя характеризуется наличием дендритной аустенитной матрицы с выделением крупных и мелких карбидов (Cr_7C_3 , M_7C_3 , WC), что обеспечивает высокую твердость до 65 HRC [16, 113]. Твердость наплавленного слоя можно оценить по формуле, учитывающей содержание карбидообразующих элементов:

$$HRC = 15 + 20 \times C + 0.5 \times Cr + 0.8 \times W + 1.2 \times V \quad (2)$$

где C, Cr, W, V — массовые доли соответствующих элементов.

Эта зависимость показывает, что твердость наплавленного слоя возрастает пропорционально концентрации карбидообразующих элементов, особенно углерода и ванадия. Однако высокая твердость сопровождается снижением пластичности, поэтому важным является обеспечение прочного сцепления наплавленного слоя с основным металлом и контроль за образованием трещин в зоне сплавления [16].

При наплавке Сармайта на сталь Л53 возникает ряд металлургических и технологических проблем, связанных с различием коэффициентов теплового расширения, теплопроводности и структурных превращений в зоне термического влияния (ЗТВ). При нагреве и охлаждении в ЗТВ происходят

фазовые превращения: аустенит → мартенсит, что приводит к образованию остаточных напряжений и к трещинообразованию [57]. Для минимизации этих эффектов применяют предварительный подогрев до 250–300 °С и последующий отжиг при 600–650 °С [70]. Также важна скорость охлаждения, которая определяется по формуле:

$$v_c = \frac{Q}{r c_p A} \quad (3)$$

где Q — тепловая мощность источника, r — плотность, c_p — удельная теплоемкость, A — площадь поперечного сечения.

Контроль скорости охлаждения позволяет избежать образования хрупких структур и улучшить ударную вязкость соединения [57]. Механические испытания образцов стали Л53 с наплавкой Сармайт показывают значительное улучшение износостойкости. По данным испытаний на абразивный износ по методу Табера или по ГОСТ 23.208-79, износ наплавленного слоя в 3–5 раз ниже, чем у ненаплавленной стали Л53 [16, 25]. График зависимости износа от времени (рис. 2.1) демонстрирует, что в начальный период происходит приработка поверхности, после чего скорость износа стабилизируется.

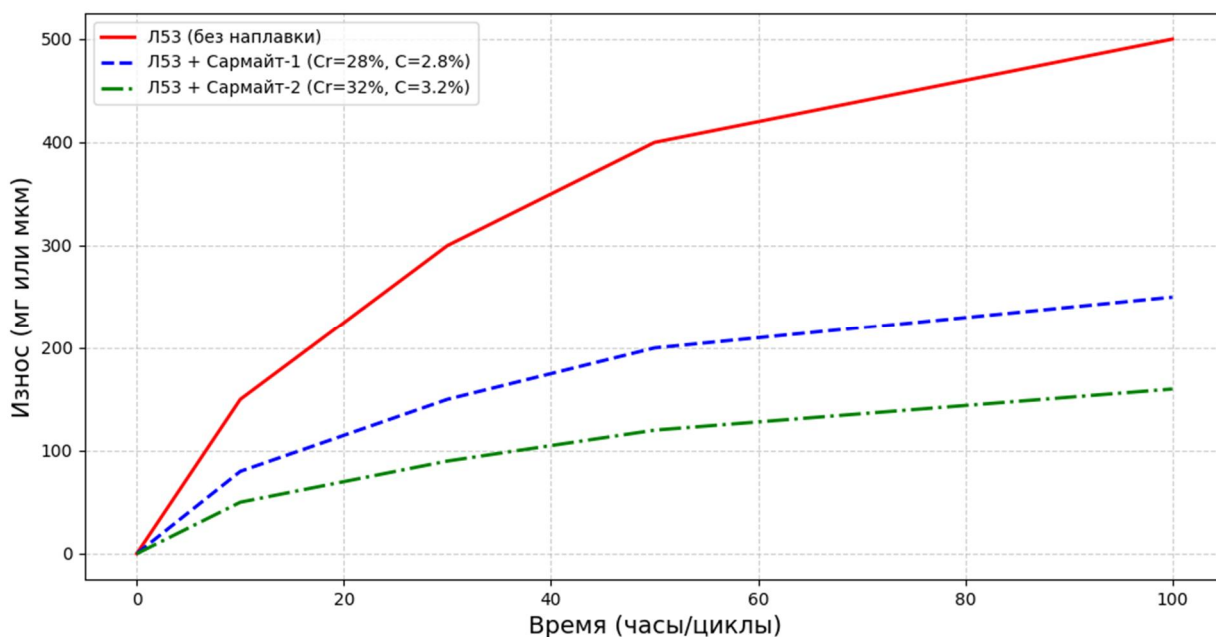


Рисунок 2.1. – Кривые абразивного износа стали Л53 и с наплавкой Сармайт

У наплавленного слоя этот период короче, а стационарная скорость износа значительно ниже. На рис. 2.1 представлены кривые износа для стали Л53, Л53 с наплавкой Сармайт-1 (Cr=28%, C=2,8%) и Л53 с наплавкой Сармайт-2 (Cr=32%, C=3,2%). Видно, что с увеличением содержания хрома и углерода износостойкость повышается, однако при содержании $C > 3,0\%$ наблюдается рост склонности к трещинообразованию, что снижает долговечность покрытия при ударных нагрузках [16].

Анализ микроструктуры с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и рентгеновской дифракции (РД) подтверждает наличие карбидной сетки в наплавленном слое.

На рис. 2.2 представлена микроструктура переходной зоны между сталью Л53 и наплавкой Сармайт.

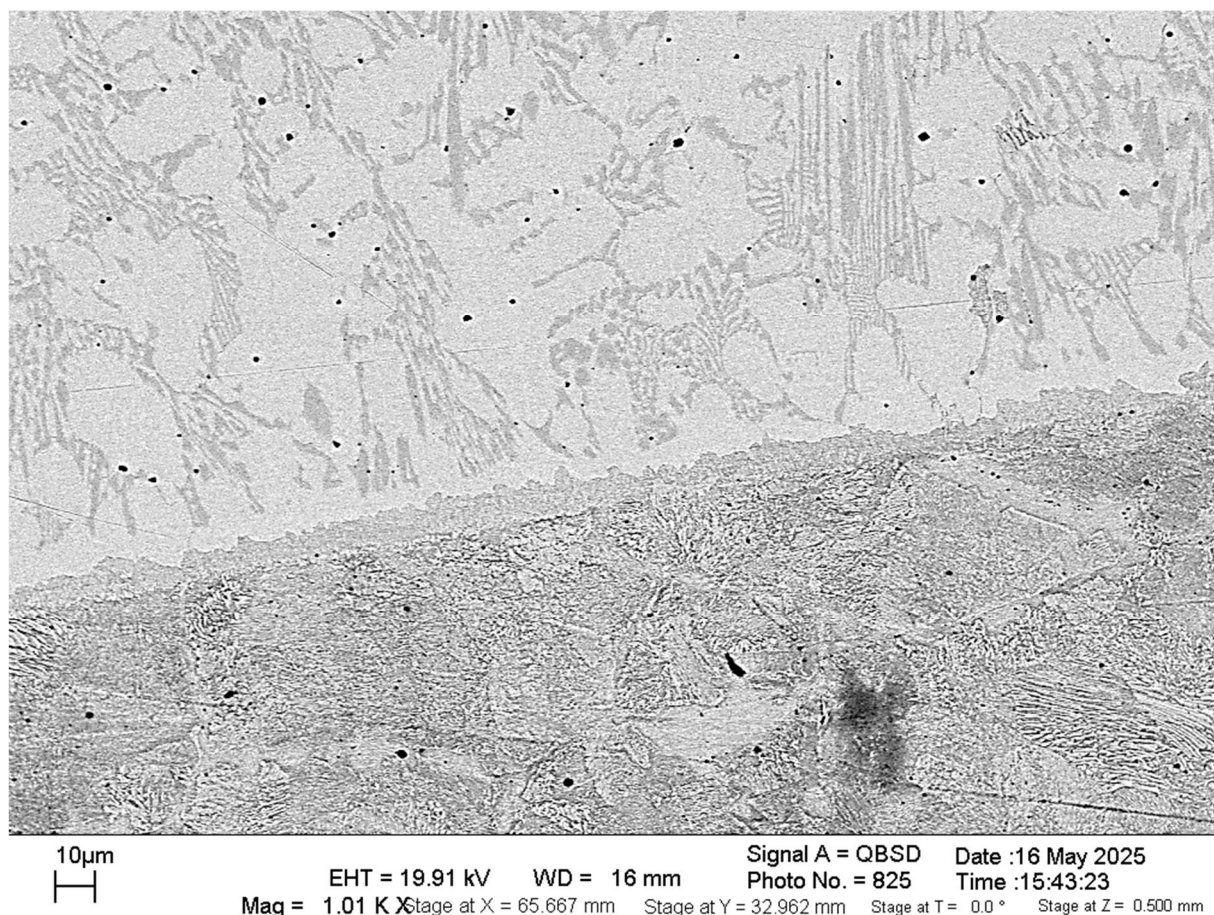


Рисунок 2.2. – Микроструктура зоны сплавления Л53 – Сармайт (СЭМ)

Видно четкое разделение: снизу — феррито-перлитная структура Л53, сверху — дендритная структура с выделением карбидов, а в центре — зона сплавления с микротрещинами, возникающими из-за термических напряжений. Ширина зоны сплавления составляет 0,3–0,5 мм, что соответствует расчетам по теплопроводности и времени удержания в расплавленном состоянии [16].

Для оценки прочности сцепления наплавленного слоя с основой применяют испытания на отрыв или на изгиб. По ГОСТ 10922-76, прочность сцепления должна составлять не менее 400 МПа. В случае стали Л53 с наплавкой Сармайт, при оптимальных режимах наплавки (ток 200–250 А, напряжение 28–32 В, скорость подачи проволоки 0,3 м/с), прочность сцепления достигает 450–500 МПа [16].

Однако при увеличении толщины наплавленного слоя свыше 6 мм наблюдается снижение прочности из-за накопления остаточных напряжений. Это можно описать уравнением:

$$\sigma_{ост} = E \times \alpha \times \Delta T \quad (4)$$

где E — модуль упругости, α — коэффициент линейного расширения, ΔT — перепад температур.

Для стали $\alpha \gg 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, $E \gg 200$ ГПа, ΔT может быть 1000°C , что дает $\sigma_{ост} \gg 2400$ МПа — значение, превышающее предел текучести, что объясняет склонность к трещинообразованию [57]. Поэтому многослойная наплавка требует промежуточного отпуска или контролируемого охлаждения [16].

Ударная вязкость является критическим параметром для деталей, работающих в условиях динамических нагрузок. Сталь Л53 без наплавки при температуре $+20^\circ\text{C}$ имеет ударную вязкость 40–50 Дж/см². После наплавки Сармайтом ударная вязкость основного металла в ЗТВ может снижаться до 20–25 Дж/см² из-за образования мартенсита [57]. Однако сам наплавленный слой хрупок, и его ударная вязкость не превышает 5–8 Дж/см², что делает его уязвимым к ударным нагрузкам. Для улучшения вязкости применяют легирование наплавочного материала никелем (до 5%), который

стабилизирует аустенитную матрицу и повышает пластичность [79]. Также эффективно использование двухслойной наплавки: первый слой — вязкий аустенитный (например, на основе Ni-Cr-Mn), второй — износостойкий Сармайт. Такой подход позволяет создать градиент свойств: от высокой вязкости у основы до высокой твердости на поверхности [16].

На рис. 2.3 представлена зависимость ударной вязкости от температуры для стали Л53 и системы Л53+Сармайт. Видно, что наплавка сдвигает кривую в сторону более высоких температур хрупкости (порог хрупкости повышается с -20°C до $+10^{\circ}\text{C}$), что указывает на снижение морозостойкости. Однако при использовании промежуточного слоя из аустенитной стали порог хрупкости снижается до -10°C , что делает систему пригодной для эксплуатации в умеренных климатических условиях [57].

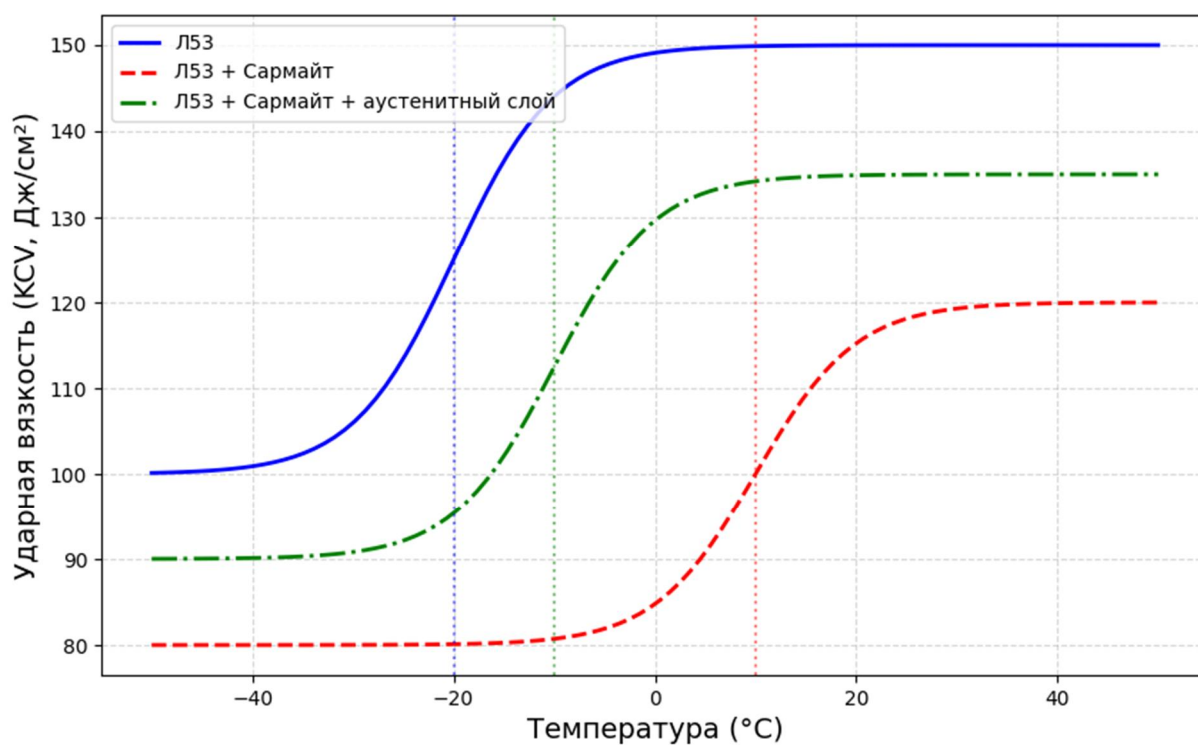


Рисунок 2.3. – Зависимость ударной вязкости от температуры

Твердость наплавленного слоя измеряется по методу Роквелла (шкала С) или Виккерса. Для Сармайта характерна твердость 60–65 HRC, что соответствует 700–800 HV [15].

Зависимость твердости от содержания углерода и хрома может быть аппроксимирована следующей формулой:

$$HRC = 10 + 18 \times C + 0.4 \times Cr + 0.7 \times W - 0.05 \times (C \times Cr) \quad (5)$$

Последнее слагаемое учитывает возможное охрупчивание при очень высоких концентрациях C и Cr . Эта формула позволяет прогнозировать твердость наплавленного слоя при подборе состава сплава. Например, при $C = 3,0\%$, $Cr = 30\%$, $W = 2\%$, расчетная твердость составляет:

$$HRC = 10 + 18 \cdot 3 + 0.4 \cdot 30 + 0.7 \cdot 2 - 0.05 \cdot (3 \cdot 30) = 10 + 54 + 12 + 1.4 - 4.5 = 72.9 \quad (6)$$

Однако реальная твердость редко превышает 65 HRC из-за ограничений по пластичности и трещинообразованию. Это указывает на необходимость компромисса между твердостью и вязкостью [16].

Износостойкость наплавленного слоя оценивается по формуле Арриди или по модифицированной модели Холлоуэя:

$$I = k \times \frac{H}{S_{max}} \quad (7)$$

где I — индекс износостойкости, k — коэффициент, зависящий от типа износа, H — твердость, S_{max} — максимальное контактное напряжение.

Для абразивного износа $k \gg 0.1 - 0.3$, и чем выше отношение $\frac{H}{S_{max}}$, тем выше износостойкость [86]. Наплавка Сармайта увеличивает это отношение в 3–4 раза по сравнению с ненаплавленной сталью Л53, что объясняет ее высокую эффективность [16, 25].

Важным аспектом является долговечность наплавленного слоя в условиях эксплуатации. Исследования показали, что срок службы стальных деталей из Л53 с наплавкой Сармайт увеличивается в 2,5–3 раза по сравнению с ненаплавленными [16]. При этом наблюдается равномерный износ поверхности без сколов и выкрашивания, что свидетельствует о хорошем сцеплении и адекватной толщине наплавленного слоя. Также отмечено снижение шума и вибраций, что связано с более гладкой и упругой поверхностью после приработки [58].

Таким образом, химический состав стали и наплавочного материала играет определяющую роль в формировании комплекса механических свойств, определяющих износостойкость. Сталь Л53, обладая высокой прочностью и ударной вязкостью, служит надежной основой для нанесения износостойких покрытий. Наплавка Сармайтом значительно повышает твердость поверхности и сопротивление абразивному износу, но требует тщательного контроля технологических параметров для предотвращения трещинообразования и снижения вязкости. Оптимизация состава наплавочного материала, использование промежуточных слоев и соблюдение режимов термообработки позволяют создать долговечные композиционные системы, эффективно работающие в условиях эксплуатации [16, 57, 80].

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой новых составов наплавочных материалов на основе Сармайта с добавлением наночастиц (например, TiC , Al_2O_3) для дополнительного дисперсионного упрочнения [84], а также с применением аддитивных технологий, таких как лазерная наплавка с управляемой подачей порошка [114]. Эти подходы позволяют достигать более точного контроля над микроструктурой и свойствами наплавленного слоя, открывая новые возможности для повышения ресурса деталей из стали Л53 и аналогичных материалов. Кроме того, активно развиваются методы математического моделирования процессов наплавки и износа с использованием метода конечных элементов (МКЭ), что позволяет прогнозировать поведение материала в эксплуатации и оптимизировать конструкцию деталей на стадии проектирования [34, 36, 37].

В заключение, можно утверждать, что влияние химического состава на износостойкость сталей является многогранным и требует системного подхода, учитывающего не только концентрацию легирующих элементов, но и их взаимодействие в процессе кристаллизации, фазовых превращений и эксплуатации. Система «сталь Л53 + наплавка Сармайт» является примером успешного сочетания прочности основы и износостойкости поверхности, демонстрируя высокий потенциал для применения в тяжелой

промышленности. Дальнейшее совершенствование таких композиционных материалов способствует повышению энергоэффективности, снижению эксплуатационных затрат и увеличению срока службы оборудования, что имеет важное экономическое и экологическое значение [77, 80].

2.2. Влияние термической обработки на механические свойства сталей (твердость, прочность и ударная вязкость)

Термическая обработка является одним из ключевых методов модификации структуры и улучшения механических свойств сталей. Она позволяет целенаправленно изменять характеристики материала (твердость, прочность и ударная вязкость), что особенно важно для сталей, применяемых в условиях высоких нагрузок и агрессивных сред [12, 57]. В металлургии термическая обработка позволяет адаптировать материал под конкретные условия эксплуатации. Одним из перспективных направлений в этой области есть использование вакуумной термической обработки, минимизирующей воздействие окислительных процессов и обеспечивающей более точный контроль параметров обработки [70]. Это важно для сталей, работающих в экстремальных условиях, таких как лемешная сталь Л53 с наплавкой Сармайт [28, 38]. В данной работе особое внимание уделяется влиянию термической обработки в вакууме на механические свойства стали Л53 с наплавкой Сармайт, рассматриваются основные аспекты термической обработки, ее физические принципы, особенности применения в вакууме и исследования по изменению механических свойств стали Л53 [57, 70].

Термическая обработка — это комплекс технологических операций, направленных на изменение структуры металла путем контролируемого нагрева, выдержки при заданной температуре и последующего охлаждения с определенной скоростью. Эти процессы позволяют модифицировать внутреннее строение материала, влияя на его фазовый состав, размер зерна, распределение примесей и уровень остаточных напряжений [12].

Основные виды термической обработки включают отжиг, нормализацию, закалку и отпуск, каждый из которых играет уникальную роль в формировании свойств металла. Отжиг предполагает медленное охлаждение после нагрева, способствуя снятию внутренних напряжений, уменьшению неоднородности структуры и улучшению обрабатываемости. Нормализация, близкая к отжигу, но с охлаждением на воздухе, обеспечивает однородную зернистость, повышая прочность и вязкость материала [12].

Закалка, в отличие от отжига, включает быстрое охлаждение (чаще всего в воде или масле), что приводит к образованию мартенсита — высокотвердой, но хрупкой структуры. Этот процесс резко увеличивает прочность и износостойкость, но требует последующего отпуска для снижения хрупкости. Отпуск представляет собой нагрев закаленного металла до умеренных температур (200–650°C) с последующим охлаждением, что позволяет частично снять внутренние напряжения и добиться оптимального баланса между твердостью и пластичностью [12, 57]

Влияние термической обработки на свойства металла определяется не только выбором процесса, но и точностью соблюдения режимов. Даже небольшие отклонения в температуре нагрева, времени выдержки или скорости охлаждения могут привести к изменениям структуры. Например, перегрев при закалке вызывает рост зерна и снижение ударной вязкости, а недостаточный отпуск сохраняет избыточную хрупкость [12, 57].

Твердость, прочность и ударная вязкость представляют собой ключевые механические характеристики металлов и сплавов, претерпевающих значительные изменения в процессе термической обработки. Эти свойства не только определяют эксплуатационные возможности материала, но и находятся в сложной взаимосвязи друг с другом, что требует подбора режимов термообработки для достижения оптимального баланса характеристик [57].

Твердость (H) — это показатель, отражающий сопротивление материала пластической деформации при локальном воздействии. Это свойство особенно важно для деталей, работающих в условиях абразивного износа или

контактных нагрузок. В металловедении твердость измеряют различными методами, каждый из которых имеет свою область применения: метод Роквелла (шкалы А, В, С) используется для контроля в производственных условиях, метод Виккерса (HV) позволяет получать данные для тонких поверхностных слоев, а метод Бринелля (HB) предпочтителен для мягких и гетерогенных материалов. Выбор конкретного метода зависит от характеристик материала и от требуемой точности измерений [86].

Прочность (σ) характеризует способность материала сопротивляться разрушению под действием внешних нагрузок и является комплексным показателем, включающим несколько параметров: предел текучести, определяющий начало пластической деформации; предел прочности, соответствующий максимальной нагрузке перед разрушением; и истинное сопротивление разрушению. При термической обработке прочностные характеристики изменяются наиболее значительно - например, закалка может увеличить предел прочности высокоуглеродистой стали в 2-3 раза, но одновременно снизить пластичность [12].

Особое место среди механических характеристик занимает ударная вязкость (KCU), отражающая способность материала поглощать энергию при динамическом нагружении и сопротивляться хрупкому разрушению. Этот параметр крайне чувствителен к структурным изменениям: наличие карбидных выделений, размер зерна и степень легирования оказывают прямое влияние на ударную вязкость [79]. Например, отпуск закаленных сталей после закалки направлен на повышение этого показателя за счет снятия внутренних напряжений и изменения структуры мартенсита [57].

Взаимосвязь этих характеристик при термической обработке носит нелинейный характер. Увеличение твердости сопровождается ростом прочности, но часто приводит к снижению ударной вязкости и пластичности. Современные методы термообработки, такие как изотермическая закалка или патентирование, позволяют в определенной степени преодолеть эту зависимость, создавая структуры с уникальным сочетанием свойств [12].

Важно отметить, что изменение механических характеристик при термической обработке обусловлено глубинными структурными преобразованиями: перераспределением углерода и легирующих элементов, изменением плотности дислокаций, образованием новых фаз и модификацией границ зерен. Например, при отпуске закаленных сталей наблюдается сложный процесс выделения дисперсных карбидов из пересыщенного твердого раствора, существенно влияющего на все три рассматриваемых показателя [12, 57].

Важным фактором, влияющим на результат термической обработки, является среда, в которой она проводится. Традиционные методы обработки в воздушной или защитной атмосфере сопровождаются окислением поверхности, что снижает качество материала. Например, окисление может привести к образованию окалины, которая снижает адгезию покрытий и увеличивает вероятность коррозии. Вакуумная термическая обработка, напротив, исключает контакт металла с кислородом, что позволяет получить более чистую поверхность и улучшить механические свойства [70]. Однако для полного понимания этого процесса необходимо рассмотреть не только теоретические основы, но и практические аспекты его реализации.

Вакуумная термическая обработка представляет собой процесс нагрева и охлаждения металла в среде с низким давлением (обычно менее 10^{-2} Па). Одним из главных преимуществ вакуумной обработки является минимизация окисления и обезуглероживания поверхности. Отсутствие кислорода предотвращает образование оксидных пленок и уменьшает потери углерода, что важно для высокоуглеродистых сталей. Вакуумная среда способствует равномерному распределению легирующих элементов по объему материала, что способствует формированию однородной структуры [70].

Контроль скорости охлаждения — важное преимущество вакуумной термической обработки. Вакуумные печи позволяют регулировать скорость охлаждения, что важно для достижения требуемых фазовых превращений. Например, быстрое охлаждение может привести к мартенситному

превращению, которое значительно увеличивает твердость материала. Однако слишком высокая скорость охлаждения может вызвать возникновение внутренних напряжений и повышение хрупкости. Поэтому выбор оптимального режима охлаждения является критически важным для достижения баланса между твердостью и ударной вязкостью [57, 70].

Несмотря на очевидные преимущества, вакуумная термическая обработка имеет и свои ограничения. Высокие требования к оборудованию и энергоемкость процесса увеличивают стоимость обработки. Тем не менее, для материалов, таких как лемешная сталь Л53, эти затраты оправданы за счет значительного улучшения эксплуатационных характеристик [70]. Также вакуумная обработка позволяет сохранить высокое качество поверхности, что важно для деталей, подвергающихся абразивному износу. Например, в случае лемешной стали Л53, используемой для изготовления плужных лемехов, сохранение чистоты поверхности напрямую влияет на ее долговечность и эффективность работы [28, 38].

Лемешная сталь Л53 относится к классу конструкционных сталей, предназначенных для изготовления рабочих органов сельскохозяйственной техники. Основные требования к этим деталям включают высокую износостойкость, достаточную прочность и ударную вязкость. Химический состав стали Л53 характеризуется повышенным содержанием углерода (до 0,5%), марганца и хрома, что обеспечивает хороший баланс между твердостью и пластичностью [28, 38].

Для повышения износостойкости поверхности лемехов часто применяется наплавка специальными сплавами, такими как Сармайт [16].

Однако сочетание стали Л53 и наплавки Сармайтом требует особого подхода к термической обработке. Различия в коэффициентах теплового расширения основного металла и наплавки могут привести к возникновению внутренних напряжений, что усложняет процесс обработки [57]. Например, при высокой скорости охлаждения может произойти растрескивание наплавленного слоя, что снизит его эксплуатационные характеристики. Для

предотвращения этого рекомендуется использовать режимы термической обработки, обеспечивающие равномерное распределение температурных напряжений [57, 70]. Экспериментальные данные показывают, что твердость стали Л53 после вакуумной закалки и отпуска достигает значений 45–50 HRC, в то время как твердость наплавленного слоя Сармайта остается на уровне 60–65 HRC [70]. Прочность стали Л53 после проведения вакуумной термической обработки демонстрирует значительное улучшение механических характеристик, что подтверждается как лабораторными исследованиями, так и промышленными испытаниями [57, 70]. Этот эффект достигается благодаря комплексному воздействию нескольких взаимосвязанных факторов, главным из которых является формирование оптимальной микроструктуры материала в условиях контролируемой безкислородной среды. При нагреве в вакууме до температур аустенитизации с последующим охлаждением в стали происходит характерное мартенситное превращение, сопровождающееся существенным измельчением зеренной структуры по сравнению с исходным состоянием. Параллельно в кристаллической решетке формируется высокая плотность дислокаций (до 10^{12} см^{-2}), что создает эффективные барьеры для движения новых дислокаций под нагрузкой и повышает сопротивление пластической деформации [55].

Наплавка Сармайтом на поверхность стали Л53 создает новые возможности для управления прочностными характеристиками композитной системы. Этот высоколегированный материал, содержащий значительное количество карбидообразующих элементов (хрома, вольфрама, ванадия), формирует на границе с основным металлом переходную зону с градиентом свойств. Микроструктурные исследования показывают, что образующиеся при наплавке мелкодисперсные карбиды и интерметаллидные фазы выступают в роли эффективных препятствий для зарождения и распространения трещин, работая по принципу "рассеивания" энергии разрушения [4]. Особенно важно, что коэффициент теплового расширения

Сармайта близок к таковому у стали Л53, что минимизирует остаточные напряжения на границе раздела при термоциклировании [57].

Однако технологический процесс требует тщательного контроля параметров охлаждения. Слишком высокая скорость охлаждения (превышающая 150-200 °C/с для данной марки стали) может привести к ряду нежелательных явлений. Во-первых, происходит неравномерное выделение карбидных фаз с образованием грубых включений размером 5-10 мкм по границам зерен. Во-вторых, возникают значительные термические напряжения, способствующие образованию микропор и других дефектов структуры. В-третьих, чрезмерно быстрое охлаждение может вызвать локальное переохлаждение аустенита с формированием хрупких структурных составляющих. Все эти факторы в совокупности приводят к заметному снижению пластичности и ударной вязкости материала - показатели относительного удлинения могут уменьшаться на 30-40% по сравнению с оптимально обработанными образцами [57].

Для устранения этих эффектов и достижения сбалансированного комплекса свойств рекомендуется обязательное проведение низкотемпературного отпуска в диапазоне 200-300 °C [57, 70]. При таких температурах происходят следующие структурные изменения: Частичный распад мартенсита с выделением дисперсных ϵ -карбидов размером 10-20 нм; Снятие внутренних напряжений без существенного уменьшения плотности дислокаций; Стабилизация остаточного аустенита (его содержание снижается до 5-8%); Улучшение морфологии карбидных фаз в наплавленном слое [57].

Важно отметить, что эффективность термической обработки стали Л53 с наплавкой Сармайтом в значительной степени зависит от точности соблюдения всех технологических параметров. Отклонение температуры отпуска на 20-30°C от оптимального значения или сокращение времени выдержки может привести к неполному протеканию релаксационных процессов и, как следствие, к нестабильности эксплуатационных характеристик [57]. Поэтому в промышленных условиях рекомендуется

использовать современные вакуумные печи с компьютерным управлением, позволяющие поддерживать температурный режим с точностью $\pm 3^{\circ}\text{C}$ и программировать сложные циклы нагрева-охлаждения [70]. Дополнительное преимущество дает применение методов неразрушающего контроля (ультразвуковой дефектоскопии, термографии) для мониторинга качества обработки на всех технологических этапах [31].

Ударная вязкость стали Л53 после вакуумной термической обработки представляет собой сложный комплексный показатель, демонстрирующий нелинейную зависимость от множества технологических параметров. Проведенные исследования показывают, что этот критически важный для конструкционных материалов параметр формируется под влиянием трех основных факторов: фазового состава стали, морфологии структурных составляющих и уровня остаточных напряжений [57, 79]. В условиях вакуумной термообработки эти факторы проявляют себя особенно ярко, так как отсутствие окислительных процессов позволяет более четко проследить влияние технологических параметров на конечные свойства материала [70].

При превышении критического значения скорости охлаждения происходит резкое снижение сопротивления ударным нагрузкам. Этот эффект обусловлен несколькими взаимосвязанными механизмами. Во-первых, чрезмерно быстрое охлаждение способствует образованию грубых игольчатых структур мартенсита с высокой плотностью дефектов кристаллической решетки. Во-вторых, в таких условиях наблюдается преимущественное выделение карбидных фаз именно по границам зерен, где они формируют непрерывные хрупкие сетки. Микроскопический анализ показывает, что размер этих карбидных выделений может достигать 5-8 мкм, что в 10-15 раз превышает оптимальные значения [57].

Особую опасность представляет сочетание крупных карбидов с высоким уровнем остаточных напряжений, возникающих при форсированном охлаждении. Такая структура становится крайне чувствительной к концентраторам напряжений - даже микроскопические дефекты поверхности

или незначительные царапины могут стать очагами зарождения разрушения при ударных нагрузках. Практические испытания демонстрируют, что в подобных условиях значение ударной вязкости КСУ может снижаться до 25-30 Дж/см², что совершенно недостаточно для большинства конструкционных применений [57].

Термическая обработка в вакууме является эффективным методом повышения механических свойств сталей [70]. Однако для достижения оптимальных результатов необходимо тщательно подбирать режимы обработки, учитывая взаимодействие основного металла и наплавки [57].

В дальнейших исследованиях следует сосредоточиться на разработке новых режимов вакуумной термической обработки, которые позволят еще больше повысить эксплуатационные характеристики лемешной стали Л53. Особое внимание следует уделить изучению влияния различных режимов отпуска на структуру и свойства наплавленного слоя Сармайта, а также разработке методов минимизации внутренних напряжений [57, 70].

2.3 Эксплуатационные факторы, влияющие на износ рабочих органов почвообрабатывающих машин

Износ рабочих органов почвообрабатывающих машин является одной из ключевых проблем сельскохозяйственного машиностроения и эксплуатации сельхозтехники [20, 34]. Этот процесс напрямую влияет на производительность, экономичность и долговечность оборудования, а также на качество выполняемых технологических операций. Рабочие органы почвообрабатывающих машин подвергаются воздействию множества факторов, таких как абразивные частицы почвы, механические нагрузки, коррозия и усталостные явления. Все это приводит к постепенному разрушению их поверхности, что снижает эффективность работы техники и увеличивает затраты на ремонт и обслуживание [34, 101].

Почвообрабатывающие машины играют ключевую роль в подготовке почвы для посева, обеспечивая оптимальные условия для роста культур.

Однако износ рабочих органов этих машин становится серьезным препятствием для достижения высокой производительности [34]. Кроме того, частые поломки и необходимость замены рабочих органов увеличивают эксплуатационные затраты, что особенно критично для фермерских хозяйств с ограниченными ресурсами [20].

Изучение факторов, способствующих износу рабочих органов, позволяет разрабатывать эффективные методы защиты и повышения их износостойкости [89, 121]. Современные исследования в этой области направлены на поиск новых материалов, улучшение конструкции рабочих органов и оптимизацию режимов работы машин [34]. В результате таких исследований можно значительно снизить затраты на ремонт и обслуживание техники, а также повысить ее долговечность и производительность. Это особенно важно в условиях интенсификации сельского хозяйства и увеличения нагрузки на технику [58].

Износ рабочих органов почвообрабатывающих машин представляет собой сложный физико-механический процесс, который возникает под воздействием различных факторов. Этот процесс можно разделить на несколько основных типов: абразивный, адгезионный, коррозионный и усталостный. Каждый из этих видов износа имеет свои особенности и механизмы развития, что требует индивидуального подхода к их изучению и предотвращению [86, 101].

Распространенным типом износа является абразивный, который вызывается взаимодействием рабочих органов с твердыми частицами почвы, содержащими минеральные примеси, такие как песок, глина или кварц [101, 116]. Абразивные частицы, находящиеся в почве, действуют как микроскопические режущие инструменты, постепенно стирая материал рабочего органа. Этот процесс особенно интенсивен при работе на песчаных почвах, где содержание абразивных частиц достигает 60–80% [101, 116].

Абразивный износ характеризуется потерей материала с поверхности рабочего органа вследствие механического воздействия абразивных частиц.

Интенсивность этого процесса зависит от множества факторов, таких как твердость материала рабочего органа, скорость движения, давление на почву, а также содержание абразивных частиц в обрабатываемой почве [103]. Например, использование материалов с высокой твердостью, таких как легированные стали или композиты, может значительно снизить интенсивность абразивного износа [25, 89]. Однако даже самые прочные материалы не могут полностью исключить этот процесс, особенно при длительной эксплуатации в экстремальных условиях [101].

Математически интенсивность абразивного износа можно описать следующей формулой [92]:

$$I = k \times P^n \times v^m \quad (8)$$

где I — интенсивность износа; k — коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств материала и абразива; P — удельное давление на рабочий орган; v — скорость относительного движения; n и m — эмпирические показатели степени, определяемые экспериментально.

Эта формула позволяет количественно оценить влияние факторов на износ и разработать рекомендации по снижению его интенсивности [34].

Кроме абразивного износа, значительное влияние на долговечность рабочих органов оказывает адгезионный износ. Этот процесс возникает при трении между поверхностями рабочего органа и почвой, когда частицы почвы прилипают к поверхности металла и затем отрываются вместе с микроскопическими частицами материала. Адгезионный износ особенно опасен при работе на влажных почвах, где почва склонна к налипанию на рабочие органы. Это приводит не только к увеличению износа, но и к повышению сопротивления движению машины, что снижает ее производительность [86].

Коррозионный износ также играет важную роль в разрушении рабочих органов [107]. Это процесс возникает под воздействием влаги, содержащейся в почве, а также химических веществ, таких как соли или органические кислоты. Коррозия приводит к образованию оксидных пленок на поверхности

металла, снижающих его прочность и способствующих разрушению. Опасен коррозионный износ для машин, работающих в условиях повышенной влажности или на засоленных почвах [107].

Усталостный износ связан с циклическими нагрузками, которые испытывают рабочие органы в процессе эксплуатации. Эти нагрузки вызывают появление микротрещин в материале, которые со временем расширяются и приводят к разрушению поверхности. Усталостный износ особенно интенсивен при работе на тяжелых почвах или при использовании машин с высокой скоростью движения [34].

Свойства почвы играют ключевую роль в формировании условий износа рабочих органов. Почва представляет собой сложную многофазную систему, состоящую из твердых частиц, воды, воздуха и органических веществ. Содержание этих частиц варьируется в зависимости от типа почвы, что значительно влияет на интенсивность износа [34, 101].

Таблица 2.1 – Зависимость абразивности почвы от ее типа [34]:

Тип почвы	Содержание абразивных частиц (%)	Относительная абразивность
Песчаная	60–80	Высокая
Супесчаная	40–60	Средняя
Суглинистая	20–40	Низкая
Глинистая	5–20	Очень низкая

Как видно из таблицы 2.1, песчаные почвы оказывают наибольшее абразивное воздействие на рабочие органы, в то время как глинистые почвы характеризуются минимальной абразивностью. Это связано с тем, что глина обладает более пластичными свойствами и меньшей твердостью по сравнению с песком. Кроме того, песчаные почвы содержат большое количество кварца, который является одним из самых твердых минералов, встречающихся в природе [101, 116].

Однако абразивность почвы — это не единственный фактор, влияющий на износ рабочих органов. Важную роль играет также влажность почвы. При повышенной влажности почва становится более пластичной, что снижает

абразивное воздействие. График на рисунке 2.4 иллюстрирует зависимость интенсивности износа от влажности почвы [34]:

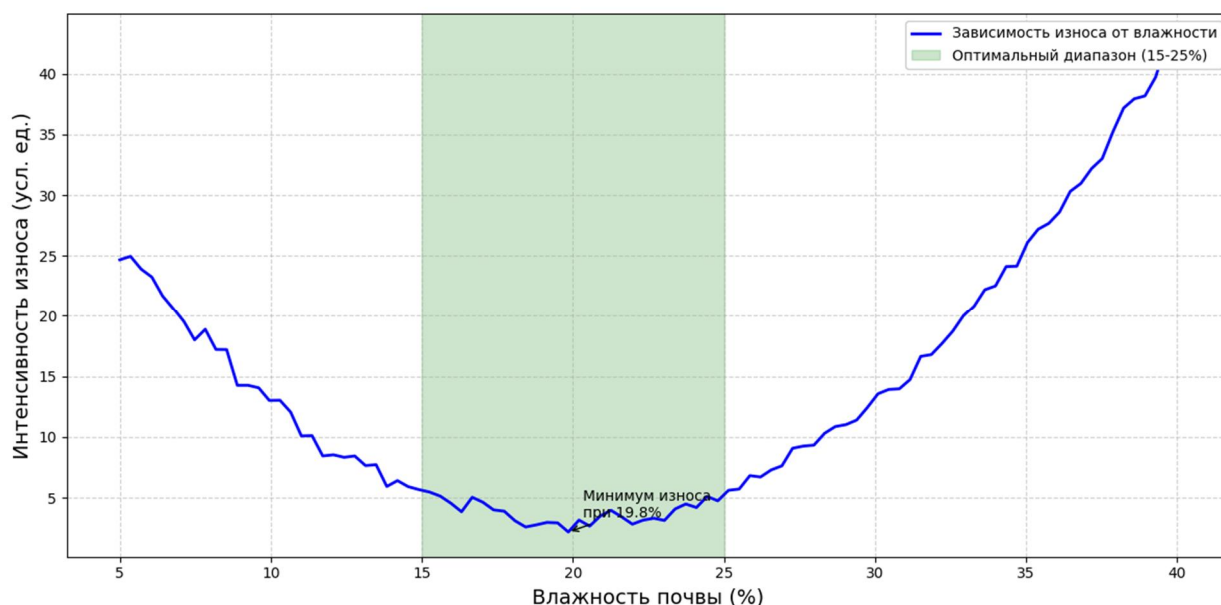


Рисунок 2.4. – График зависимости износа от влажности почвы

На рисунке 2.4 видно, что оптимальная влажность почвы для минимизации износа находится в диапазоне 15–25%. При этом следует учитывать, что данная зависимость может варьироваться в зависимости от типа почвы и материала рабочих органов. Например, для песчаных почв оптимальная влажность может быть ниже, чем для глинистых [34].

Кроме того, плотность почвы также оказывает значительное влияние на износ. Более плотные почвы создают большее сопротивление движению рабочих органов, что увеличивает контактные напряжения и ускоряет процесс износа. Это особенно важно при работе на тяжелых суглинистых почвах, где плотность может достигать 1.5–1.8 г/см³ [34].

Режимы работы почвообрабатывающих машин, таких как скорость движения, глубина обработки и усилие на рабочие органы, также оказывают существенное влияние на износ. Скорость движения машины напрямую связана с интенсивностью абразивного воздействия. Увеличение скорости приводит к возрастанию энергии столкновений между абразивными частицами и поверхностью рабочего органа, что усиливает процесс износа

[107]. Например, при увеличении скорости с 5 до 10 км/ч интенсивность износа может возрасти в 2–3 раза [34].

Глубина обработки почвы определяет площадь контакта рабочего органа с абразивными частицами. При увеличении глубины обработки возрастает объем почвы, взаимодействующий с рабочим органом, что приводит к увеличению износа. Например, при увеличении глубины обработки с 10 до 20 см объем почвы, проходящей через рабочий орган, увеличивается в 2 раза, что увеличивает интенсивность износа [34].

Усилие на рабочий орган, передаваемое через механизм машины, также играет важную роль. Чрезмерное усилие может вызывать деформацию рабочего органа, что ухудшает его геометрию и увеличивает контактные напряжения, способствуя ускоренному износу. Например, при увеличении усилия с 100 до 200 кН интенсивность износа может возрасти на 50–70%.

Для количественной оценки влияния режимов работы на износ можно использовать следующую формулу:

$$W = C \times S \times d \times v \quad (9)$$

где W — объем изношенного материала; C — коэффициент, учитывающий свойства почвы и материала рабочего органа; S — площадь контакта рабочего органа с почвой; d — глубина обработки; v — скорость движения.

Материалы, из которых изготовлены рабочие органы почвообрабатывающих машин, играют ключевую роль в их износостойкости [89]. Традиционно для изготовления таких элементов используются стали марок, обладающие высокой твердостью, прочностью и устойчивостью к механическим нагрузкам [25, 28, 38]. Однако даже самые качественные стали подвержены износу при длительной эксплуатации, особенно в условиях интенсивного взаимодействия с абразивными частицами почвы. Это побуждает исследователей и производителей искать новые материалы и технологии, которые позволят повысить долговечность рабочих органов [89].

Одним из перспективных направлений является использование композитных материалов. Композиты представляют собой сочетание

материалов, каждому из которых отводится определенная функция. Например, металлическая матрица обеспечивает прочность конструкции, а наполнители, такие как карбиды, нитриды или оксиды, повышают твердость и износостойкость поверхности [112]. Примером могут служить металлокерамические композиты, содержащие частицы карбида вольфрама или карбида титана, они обладают высокой твердостью и способны выдерживать механические нагрузки без существенного износа [105].

Другим эффективным методом повышения износостойкости является нанесение специальных упрочняющих покрытий на поверхность рабочих органов [89, 119]. Одними из наиболее популярных покрытий являются карбид вольфрама (WC) и нитрид титана (TiN) [117, 118]. Карбид вольфрама известен своей исключительно высокой твердостью и стойкостью к абразивному износу. Он широко применяется в режущем инструменте, где требуется высокая износостойкость [105]. Нитрид титана, помимо высокой твердости, обладает отличной коррозионной стойкостью, что делает его особенно полезным для работы в условиях повышенной влажности [118].

Эффективность покрытий оценивается с помощью коэффициента износостойкости [88]:

$$K_i = \frac{V_0}{V} \quad (10)$$

где V_0 — объем износа без покрытия; V — объем износа с покрытием.

Как видно из таблицы 2.2, использование современных покрытий позволяет повысить износостойкость рабочих органов в несколько раз.

Таблица 2.2 – Сравнение износостойкости различных материалов и покрытий [89, 105, 118]:

Материал/Покрытие	Коэффициент износостойкости
Углеродистая сталь	1
Легированная сталь	1.5
Карбид вольфрама	5
Нитрид титана	7

Например, нанесение покрытия из нитрида титана увеличивает срок службы рабочего органа в 7 раз по сравнению с углеродистой сталью. Это делает покрытия привлекательными для применения в сельскохозяйственной технике, работающей в экстремальных условиях [89, 118].

Кроме того, современные технологии позволяют создавать многослойные покрытия, сочетающие в себе различные материалы. Например, комбинация карбида вольфрама и нитрида титана позволяет повысить твердость и коррозионную стойкость поверхности. Такие покрытия эффективны при работе на засоленных или переувлажненных почвах, где коррозия представляет серьезную проблему [89].

Конструктивные особенности рабочих органов также оказывают значительное влияние на их износ [121, 111]. Оптимизация формы и геометрии рабочих органов позволяет снизить контактные напряжения и улучшить условия взаимодействия с почвой. Например, использование закругленных кромок вместо острых углов снижает концентрацию напряжений и замедляет процесс износа, так как острые углы подвержены более высоким локальным нагрузкам, что приводит к разрушению [34].

Одним из примеров успешной оптимизации конструкции является использование многолезвийных рабочих органов. Такие конструкции позволяют равномерно распределить нагрузку между различными участками рабочего органа, что увеличивает его долговечность.

Современные методы компьютерного моделирования и анализа позволяют оптимизировать конструкцию рабочих органов с учетом конкретных условий эксплуатации [100]. Использование программного обеспечения, такого как ANSYS или SolidWorks, позволяет смоделировать взаимодействие рабочего органа с почвой и определить области максимального износа. На основе этих данных можно внести изменения в конструкцию, чтобы минимизировать износ и повысить долговечность.

Например, исследование, проведенное на базе одного из сельскохозяйственных предприятий, показало, что изменение угла наклона

лезвия плуга с 30° до 45° позволило снизить интенсивность износа на 25%. Это связано с тем, что больший угол наклона снижает контактное давление между лезвием и почвой, что уменьшает абразивное воздействие.

Кроме того, важную роль играет выбор материала для различных частей рабочего органа. Например, режущие кромки могут быть изготовлены из более твердых и износостойких материалов, таких как легированные стали или композиты, в то время как основная часть рабочего органа может быть выполнена из менее дорогих материалов. Это позволяет снизить затраты на производство, сохраняя высокую износостойкость важных участков [89].

Восстановление рабочих органов после износа является важным аспектом, требующим внимания [16, 76]. Современные технологии позволяют не только продлить срок службы рабочих органов, но и восстановить их первоначальные характеристики. Например, использование наплавки твердыми сплавами позволяет восстановить изношенные участки поверхности и даже улучшить их свойства по сравнению с исходными [16].

Одним из распространенных методов восстановления является электродуговая наплавка. Этот метод заключается в нанесении слоя твердого сплава на изношенную поверхность с помощью электрической дуги. Его преимуществом является возможность нанесения покрытия с высокой точностью и минимальными деформациями. Кроме того, электродуговая наплавка позволяет использовать широкий спектр материалов, таких как карбиды, бориды и другие твердые сплавы [16].

Таблица 2.3 – Сравнение различных методов восстановления [16, 76, 113]:

Метод восстановления	Толщина покрытия (мм)	Износостойкость (по сравнению с исходной)	Стоимость (относительная)
Электродуговая наплавка	1–3	2–3	Средняя
Лазерная наплавка	0.5–2	4–5	Высокая
Гальваническое покрытие	0.1–0.5	1.5–2	Низкая

Другой метод восстановления — это лазерная наплавка. Этот метод основан на использовании лазерного луча для плавления материала покрытия

и его нанесения на поверхность рабочего органа. Лазерная наплавка отличается высокой точностью и минимальным термическим воздействием на основной материал, что снижает риск деформации и коробления [113]. Как видно из таблицы 2.3, лазерная наплавка обеспечивает наибольшую износостойкость, но при этом имеет высокую стоимость. Электродуговая наплавка является более доступным вариантом, который также обеспечивает значительное повышение износостойкости [16, 113].

Автоматизация и мониторинг состояния рабочих органов становятся важными аспектами в управлении износом [20, 34]. Современные системы мониторинга позволяют в реальном времени отслеживать состояние рабочих органов и предупреждать о необходимости ремонта или замены. Это позволяет избежать внезапных поломок и снизить затраты на ремонт [20].

Например, использование датчиков износа, установленных на рабочих органах, позволяет определить степень их износа и прогнозировать остаточный ресурс. Эти данные могут быть переданы на центральный компьютер, где они анализируются с помощью специального программного обеспечения. На основе анализа формируются рекомендации по обслуживанию и ремонту техники [34, 36, 37].

Кроме того, автоматизация процессов управления режимами работы машины позволяет минимизировать износ рабочих органов. Например, системы автоматического регулирования скорости движения и глубины обработки почвы могут адаптироваться к текущим условиям работы, снижая нагрузку на рабочие органы и продлевая их срок службы [34].

Износ рабочих органов почвообрабатывающих машин является сложным многофакторным процессом, зависящим от свойств почвы, режимов работы машины, материалов и конструкции рабочих органов [34, 101]. Для минимизации износа необходимо комплексное рассмотрение всех этих факторов и применение технологий, таких как упрочняющие покрытия, оптимизация конструкции и автоматизация процессов управления [89].

2.4 Обзор методов синтеза упрочняющих покрытий, напыляемых вакуумным методом

В современной промышленности упрочняющие покрытия играют ключевую роль в повышении износостойкости, коррозионной стойкости и механических свойств деталей машин и инструментов, особенно в условиях интенсивного трения, высоких температур и агрессивных сред [89, 116]. С развитием технологий обработки материалов и ростом требований к ресурсу и надежности функциональных узлов, все большее значение приобретают методы модификации поверхностей, позволяющие не только продлить срок службы изделий, но и расширить их эксплуатационные возможности. Особое внимание в последние десятилетия уделяется вакуумным методам нанесения покрытий, которые позволяют создавать материалы с высокими эксплуатационными характеристиками и контролируемыми микроструктурными свойствами [32, 33, 35]. Эти методы обеспечивают высокую чистоту процесса, точность контроля толщины и состава покрытия, а также возможность формирования многослойных и композиционных структур. Цель данного литературного обзора — провести всесторонний анализ существующих методов синтеза упрочняющих покрытий, осаждаемых вакуумными методами, с акцентом на физические принципы, лежащие в их основе, дать строгую математическую формализацию процессов, предложить классификацию методов, выполнить сравнительный анализ защитных покрытий с учетом их микроструктуры и физических свойств, а также научно обосновать выбор нитрида титана (TiN) в качестве упрочняющего покрытия, наносимого на наплавку из сормайта, выполненной на лемешной стали Л53, с последующим отжигом [32, 33, 118]. Такой подход позволит не только систематизировать имеющиеся знания, но и предложить оптимальную технологическую цепочку для повышения эксплуатационных характеристик сельскохозяйственных орудий [80].

Классификация методов синтеза упрочняющих покрытий, осаждаемых в вакууме, представляет собой важный этап в понимании их особенностей,

преимуществ и ограничений. В настоящее время такие методы можно условно разделить на четыре основные группы: физическое осаждение из газовой фазы (PVD), химическое осаждение из газовой фазы (CVD), ионно-плазменное напыление и комбинированные гибридные методы [32, 33, 35]. Каждая из этих групп включает в себя ряд подметодов, отличающихся по механизму переноса вещества, условиям проведения процесса, типу источника энергии и получаемым свойствам покрытий. Физическое осаждение из газовой фазы (Physical Vapor Deposition, PVD) — это группа методов, основанных на физическом испарении или распылении материала мишени в вакууме с последующей конденсацией его паров на поверхности подложки. Основные подгруппы PVD включают электронно-лучевое испарение, лазерное абляционное осаждение, ионно-плазменное распыление (включая магнетронное распыление и катодную дугу). Химическое осаждение из газовой фазы (Chemical Vapor Deposition, CVD) отличается от PVD тем, что покрытие формируется в результате химических реакций между газообразными реагентами на поверхности подложки, что требует высоких температур и использования реактивных газов [31, 33]. Ионно-плазменное напыление — это группа методов, использующих плазму для активации процессов осаждения, обеспечивая высокую энергию частиц и улучшая адгезию покрытия. Комбинированные методы, такие как PVD/CVD-гибриды или реактивное магнетронное распыление, позволяют объединить достоинства нескольких, достигая уникальных свойств покрытий [14]. Выбор конкретного метода зависит от требований к покрытию, типа подложки, экономических факторов и доступного оборудования [33].

Физические принципы, лежащие в основе методов синтеза упрочняющих покрытий, определяют эффективность процесса, структуру и свойства получаемых слоев. Эти принципы можно описать математическим формализмом, что позволяет моделировать процессы, оптимизировать параметры и прогнозировать результат. Рассмотрим каждый из методов.

Физическое осаждение из газовой фазы (PVD) основано на трех этапах: испарение или распыление материала, транспорт частиц в вакууме и конденсация на подложке. На этапе испарения материал переводится в газообразное состояние за счет внешнего источника энергии. В условиях глубокого вакуума (обычно 10^{-3} – 10^{-6} Па) пары атомов или молекул свободно перемещаются к подложке без столкновений с остаточными газами, что обеспечивает высокую чистоту покрытия. Процесс испарения подчиняется закону Кнудсена, который описывает поток атомов, покидающих поверхность испарения [33]:

$$J = \frac{p}{\sqrt{2\pi m k_B T}} \quad (11)$$

где J — поток атомов (в атомах/с·м²), p — давление пара материала над поверхностью, m — масса одного атома, k_B — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура поверхности.

Этот закон показывает, что поток испарения растет с увеличением давления пара и уменьшением массы атома, что объясняет предпочтение легких материалов для испарения при одинаковых температурах.

В случае магнетронного распыления, одного из наиболее распространенных методов PVD, используется комбинация электрического и магнитного полей для создания плазмы вблизи мишени. Аргон, подаваемый в камеру, ионизируется под действием электрического поля. Ионы Ar^+ ускоряются к катоду (мишени) и выбивают атомы материала за счет каскадных столкновений. Ключевым элементом является магнитное поле, которое удерживает электроны вблизи поверхности мишени, увеличивая вероятность ионизации и плотность плазмы. Движение заряженных частиц в электромагнитном поле описывается уравнением Лоренца [35]:

$$\dot{\vec{F}} = q(\dot{\vec{E}} + \dot{\vec{v}} \times \dot{\vec{B}}) \quad (12)$$

где $\dot{\vec{F}}$ — сила Лоренца, q — заряд частицы, $\dot{\vec{E}}$ — напряженность электрического поля, $\dot{\vec{v}}$ — скорость частицы, $\dot{\vec{B}}$ — магнитная индукция.

На этом уравнении основано моделирование траекторий электронов и ионов в плазме, что оптимизирует геометрию магнитной системы для достижения максимальной плотности плазмы и равномерности распыления.

Транспорт частиц от мишени к подложке в вакууме описывается кинетической теорией газов. При низких давлениях (режим свободного пробега) атомы движутся по прямым траекториям, и распределение потока на подложке можно рассчитать по закону косинуса Ламберта [33]:

$$J(q) = J_0 \cos q \quad (13)$$

где $J(q)$ — плотность потока в направлении угла q относительно нормали к поверхности мишени, J_0 — плотность потока по нормали.

Этот закон важен для расчета равномерности покрытия и выбора геометрии установки.

Конденсация атомов на подложке сопровождается образованием зародышей, их ростом и коалесценцией. Процесс описывается теорией гетерогенного зарождения, где энергия активации образования критического зародыша определяется выражением [33]:

$$DG^* = \frac{16pg^3}{3(Dm)^2} \quad (14)$$

где g — поверхностная энергия, Dm — химический потенциал пересыщенного пара.

Чем ниже температура подложки, тем выше пересыщение и выше скорость зарождения, что приводит к мелкозернистой структуре покрытия.

Вторая группа методов — химическое осаждение из газовой фазы (CVD) — основана на химических реакциях между газообразными реагентами на поверхности нагретой подложки [33, 31]. Например, для получения нитрида титана используется реакция [33]:



Эта реакция протекает при температурах выше 800 °С, что обеспечивает достаточную энергию для разрыва химических связей и активации процессов.

Скорость осаждения в CVD определяется кинетикой химической реакции и описывается законом Аррениуса [33, 31]:

$$k = A \exp \left(-\frac{E_a}{RT} \right) \quad (16)$$

где k — константа скорости реакции, A — предэкспоненциальный множитель, E_a — энергия активации, R — универсальная газовая постоянная, T — температура.

Эта формула показывает экспоненциальную зависимость скорости от температуры, что делает CVD высокотемпературным процессом. Однако высокая температура может приводить к диффузионным процессам в подложке, изменению её структуры и охрупчиванию [33].

Третья группа — ионно-плазменное напыление — включает методы, в которых плазма используется не только для генерации частиц, но и для их активации. Примером является катодная дуга, где на мишени формируется микродуговой разряд, приводящий к локальному испарению и ионизации материала. Плотность тока в катодном пятне достигает 10^8 – 10^{10} А/м², что приводит к образованию высокоионизированного потока (до 90 % ионов). Энергия ионов может достигать нескольких сотен электрон-вольт, что способствует улучшению адгезии и плотности покрытия. Плотность тока в плазменном разряде описывается законом Чайлда-Ленгмюра для несамостоятельного разряда [35]:

$$j = \frac{4e_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{(U - U_0)^{3/2}}{d^2} \quad (17)$$

где j — плотность тока, e_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, e — заряд электрона, m — масса иона, U — приложенное напряжение, U_0 — контактная разность потенциалов, d — расстояние между электродами.

Этот закон показывает, что плотность тока растет с кубом напряжения, что объясняет высокую эффективность катодной дуги при высоких напряжениях.

Комбинированные методы, позволяют синтезировать сложные соединения (например, TiN, CrN, Al₂O₃) путем введения реактивного газа в

атмосферу аргона. При этом распыляется металлическая мишень, а реакция с газом происходит на поверхности подложки или в объеме плазмы. Процесс можно описать системой уравнений диффузии и реакции [35]:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D_i \nabla^2 C_i - R_i(C_1, C_2, \dots) \quad (18)$$

где C_i — концентрация i -го компонента, D_i — коэффициент диффузии, R_i — скорость химической реакции.

Такой подход позволяет моделировать переход от металлического к реактивному режиму осаждения и управлять стехиометрией покрытия. Сравнительный анализ существующих защитных покрытий, наносимых вакуумными методами, позволяет выявить оптимальные материалы. Ниже представлена таблица 2.4, содержащая ключевые характеристики распространенных упрочняющих покрытий.

Фундаментальная взаимосвязь между микроструктурой защитных покрытий и их эксплуатационными характеристиками определяется сложным сочетанием атомного строения, типа химических связей и особенностей кристаллической решетки. Ярким примером такой взаимозависимости служит нитрид титана (TiN) - материал, широко востребованный в промышленности благодаря уникальному комплексу свойств [118].

Природа этих свойств состоит в особенностях межатомных взаимодействий, где металлическая составляющая, обусловленная делокализованными электронами титана, обеспечивает электропроводность и пластичность, в то время как прочные ковалентные связи между атомами титана и азота отвечают за исключительную твердость. Дополнительную стабильность системе придает ионная компонента связи, возникающая благодаря частичному перераспределению электронной плотности.

Такой симбиоз типов химических связей проявляется в характерной кубической решетке типа NaCl с параметром 4.24 Å, где каждый атом титана окружен шестью атомами азота, формируя плотнейшую упаковку.

Таблица 2.4 – Характеристики упрочняющих покрытий [10, 12, 117, 118]:

Покрытие	Микро-структура	Твердость (ГПа)	Износостойкость	Коррозионная стойкость	Температура эксплуатации (°C)	Метод нанесения
TiN	Кубическая (NaCl), текстурированная	20–30	Высокая	Отличная	до 600	PVD (магнетрон, дуга)
CrN	Гексагональная, поликристаллическая	15–25	Средняя–высокая	Хорошая	до 700	PVD, CVD
Al ₂ O ₃	α-фаза (корунд), аморфная при низких T	18–22	Средняя	Отличная	до 1000	CVD
DLC (алмазоподобный углерод)	Аморфная, sp ³ -связи	40–80	Очень высокая	Умеренная	до 300	PVD, PECVD
TiAlN	Кубическая, нанокompозитная	28–35	Очень высокая	Отличная	до 800	PVD
ZrN	Кубическая, аналогична TiN	20–25	Высокая	Хорошая	до 600	PVD

Эта изотропная структура на практике приобретает выраженную анизотропию свойств из-за текстурированности - преимущественной ориентации кристаллографических плоскостей. Например, преобладание плотноупакованных плоскостей (111) обеспечивает максимальную твердость, тогда как ориентация (200) способствует лучшей адгезии к подложке за счет равномерного распределения напряжений [118]. Не менее важную роль играет морфология микроструктуры, формирующаяся в процессе осаждения покрытия. При низких температурах образуется мелкозернистая структура с размером зерен менее 100 нм, где значительный вклад в упрочнение вносит эффект Холла-Петча, связанный с большим количеством границ зерен. Однако при повышении температуры подложки наблюдается рост столбчатых зерен размером свыше 500 нм, что хотя и улучшает термическую стабильность, но может снижать прочность сцепления с основным материалом из-за уменьшения площади контакта [118]. Таким образом, варьируя параметры

технологического процесса, такие как температура осаждения, состав газовой среды и энергия ионов, можно управлять микроструктурой и эксплуатационными характеристиками покрытия [32, 33].

Аморфные покрытия, такие как алмазоподобный углерод (DLC), представляют класс материалов, отличающихся от кристаллических аналогов отсутствием дальнего порядка в атомной структуре. Это строение, характеризующееся только ближним порядком расположения атомов, полностью исключает наличие зеренных границ – традиционных источников зарождения и распространения трещин в кристаллических материалах. Благодаря этому DLC-покрытия демонстрируют исключительную трещиностойкость и износостойкость, особенно в условиях контактного трения и циклических нагрузок. Однако отсутствие кристаллической решетки имеет и обратную сторону – такие покрытия обладают чрезвычайно высоким уровнем внутренних напряжений, достигающим 10 ГПа и более, что связано с особенностями их формирования в неравновесных условиях осаждения. Эти напряжения, имеющие преимущественно сжимающий характер, с одной стороны могут повышать твердость покрытия, но с другой – становятся причиной его отслоения от подложки при превышении критической толщины или в условиях термического воздействия [117].

Ключевой особенностью DLC-покрытий, определяющей их физико-механические свойства, является соотношение sp^3 - и sp^2 -гибридизированных связей между атомами углерода. Именно доля sp^3 -связей, характерных для алмаза, отвечает за такие характеристики как высокая твердость (до 80 ГПа), модуль упругости и химическая инертность. В то же время присутствие sp^2 -фаз, свойственных графиту, обеспечивает материалам DLC некоторую пластичность и способность к перераспределению напряжений. Баланс между этими двумя типами связей зависит от параметров процесса осаждения, среди которых энергия ионов. При использовании методов ионно-лучевого напыления или магнетронного распыления с ионной имплантацией увеличение энергии частиц приводит к росту содержания sp^3 -фаз, так как

высокоэнергетические ионы способны внедряться в покрытие, создавая локальные области с алмазоподобной структурой [117].

Технологические аспекты формирования DLC-покрытий требуют особого внимания к выбору параметров осаждения. Помимо энергии ионов, критическое влияние на свойства покрытий оказывает состав рабочей газовой среды, давление в камере, температура подложки и наличие дополнительного смещения. Особый интерес представляют градиентные DLC-структуры, где состав и свойства плавно изменяются по толщине – от более мягкого и пластичного слоя у подложки до сверхтвердого на поверхности. Такой подход позволяет решать проблемы адгезии и износостойкости [117].

Зависимость твердости от доли sp^3 задана формулой [117]:

$$H = H_0 + k f_{sp^3} \quad (19)$$

где H — твердость, H_0 — базовая твердость, k — коэффициент, f_{sp^3} — доля sp^3 -связей.

Коррозионностойкие покрытия на основе оксида алюминия (Al_2O_3) занимают особое место среди защитных материалов благодаря своей исключительной химической устойчивости, особенно когда речь идет о стабильной α -фазе. Эта модификация оксида алюминия демонстрирует выдающуюся стойкость к агрессивным средам благодаря сочетанию двух ключевых факторов: предельной химической инертности, обусловленной прочными ионно-ковалентными связями Al-O, и чрезвычайно низкой диффузионной проницаемостью, связанной с плотной гексагональной упаковкой атомов в кристаллической решетке корунда. Такое сочетание свойств делает α - Al_2O_3 практически идеальным барьером против окисления, воздействия кислот и щелочей, а также высокотемпературной коррозии. Однако технологический парадокс заключается в том, что именно условия, необходимые для получения этой наиболее стабильной фазы – температуры выше $1000^\circ C$ – существенно ограничивают область ее практического применения, особенно когда речь идет о стальных подложках, которые при

таких температурах подвергаются нежелательным структурным изменениям, включая рост зерна, обезуглероживание и коробление [117].

Проблема высокотемпературного синтеза α - Al_2O_3 привела к активному изучению низкотемпературных модификаций оксида алюминия, таких как γ - и κ -фазы, которые могут осаждаться при температурах 500-800 °С, что делает их технологически совместимыми с большинством стальных сплавов. Эти метастабильные фазы образуют наноструктурированные покрытия с развитой поверхностью и несколько иным механизмом защиты – за счет сочетания химической стойкости с особыми морфологическими характеристиками. Однако их главным недостатком остается термическая и фазовая нестабильность: при длительной эксплуатации в условиях повышенных температур или под механической нагрузкой происходит нежелательное фазовое превращение в α -модификацию, сопровождающееся изменением объема и возникновением внутренних напряжений. Особенно критично это проявляется в циклических температурных режимах, где повторяющиеся фазовые переходы могут привести к растрескиванию и отслоению защитного слоя [117].

Современные исследования в области Al_2O_3 -покрытий направлены на поиск компромиссных решений, позволяющих сочетать преимущества α -фазы с технологичностью низкотемпературного осаждения. Одним из перспективных подходов является создание композитных и наноструктурированных покрытий, где тонкие прослойки α - Al_2O_3 чередуются с другими фазами оксида алюминия или дополнительными компонентами (например, TiO_2 или Cr_2O_3), что позволяет стабилизировать структуру и снизить температуру кристаллизации. Другой активно развивающийся метод – использование плазменного и ионно-лучевого воздействия для локальной активации поверхности, что способствует образованию α -фазы в отдельных нанодоменах даже при относительно низких температурах. Особый интерес представляют градиентные покрытия с плавным изменением фазового состава

по толщине – от метастабильных фаз у подложки до стабильного α - Al_2O_3 в поверхностных слоях [117].

Практическое применение Al_2O_3 -покрытий варьируется в зависимости от их фазового состава и способа нанесения. Традиционные высокотемпературные α -покрытия находят применение в специализированных областях, таких как защита жаропрочных никелевых сплавов в газотурбинных двигателях или покрытие керамических режущих пластин. Низкотемпературные модификации чаще используют для защиты инструментальных сталей. Особенно перспективным направлением представляется создание "умных" самовосстанавливающихся покрытий на основе оксида алюминия, где при повреждении поверхностного слоя происходит локальное фазовое превращение с образованием новой защитной α -фазы. Несмотря на существующие технологические ограничения, постоянное совершенствование методов осаждения и комбинирование различных модификаций Al_2O_3 открывает возможности для создания адаптивных коррозионностойких покрытий с расширенным температурным диапазоном эксплуатации [117].

Научно-техническое обоснование выбора нитрида титана (TiN) в качестве упрочняющего покрытия для наплавки из Сормайта, нанесенной на лемешную сталь Л53, базируется на комплексе факторов: совместимости материалов, условиях эксплуатации, термодинамических и механических свойствах. Лемешная сталь Л53 — это конструкционная сталь, используемая в сельскохозяйственных орудиях, работающих в условиях абразивного износа, ударных нагрузок и коррозии почвенной средой [28, 38]. Для повышения износостойкости на режущие кромки наносят наплавочные сплавы, такие как Сормайт [16]. Однако Сормайт, хотя и обладает высокой твердостью (HRC 60–65), имеет ограниченную коррозионную стойкость и может подвергаться окислению при повышенных температурах.

Покрытие TiN идеально дополняет эти свойства. Его твердость (20–30 ГПа, что соответствует ~2500–3000 HV) значительно превышает твердость

Сормайта (~1000 HV) и стали Л53 (~200 HV), что обеспечивает эффективную защиту от абразивного износа [118]. Кроме того, TiN обладает низким коэффициентом трения (0.4–0.6 против стали), что снижает силы сопротивления при работе в почве. Коррозионная стойкость TiN обусловлена пассивирующим слоем TiO₂, который образуется на поверхности при контакте с влагой, предотвращая дальнейшее окисление. Электрохимические исследования показывают, что потенциал коррозии TiN в 3 % NaCl на 300–500 мВ положительнее, чем у Сормайта [118].

Механизм адгезии TiN к Сормайту и стали Л53 также важен. При нанесении методом PVD происходит ионная очистка поверхности, что удаляет оксиды и загрязнения, обеспечивая металлический контакт. Далее формируется переходный слой Ti, который диффундирует в подложку, создавая прочное сцепление. Энергия адгезии W_{ad} оценена по формуле [32]:

$$W_{ad} = g_{TiN} + g_{sub} - g_{TiN-sub} \quad (20)$$

где g — поверхностные энергии.

Высокая адгезия достигается при близких значениях g . После нанесения TiN рекомендуется проведение отжига в вакууме или инертной атмосфере при температуре 500 °С [70]. Цель отжига — снятие остаточных напряжений, возникающих при осаждении из-за разницы в коэффициентах теплового расширения ($\alpha_{TiN} \approx 9.4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{стали} \approx 12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Напряжения можно оценить по закону Гука [57]:

$$s = E \times a \times \Delta T \quad (21)$$

где E — модуль Юнга, a — коэффициент линейного расширения, ΔT — перепад температур.

Отжиг при 500 °С в течение 1–2 часов позволяет снизить напряжения на 50–70 %, не вызывая при этом диффузии Ti в сталь или разупрочнения Сормайта. Кроме того, отжиг способствует рекристаллизации и укрупнению зерен, что может улучшить пластичность покрытия [57, 70].

Таким образом, предложенная технологическая цепочка — наплавка Сормайта на сталь Л53 → ионная очистка → магнетронное осаждение TiN →

вакуумный отжиг при 500 °С — обеспечивает комплексное упрочнение поверхности с сохранением прочности основы и повышением износостойкости, коррозионной стойкости и срока службы [4, 70, 118]. Математическое моделирование процессов позволяет оптимизировать параметры и гарантировать стабильность свойств [33, 35].

В заключение, анализ методов синтеза упрочняющих покрытий, осаждаемых вакуумными методами, показал, что нитрид титана является оптимальным выбором для защиты лемешной стали Л53 с наплавкой из Сормайта [118]. Его механические, коррозионные и трибологические свойства, а также совместимость с технологией PVD и возможностью последующего отжига делают его привлекательным для промышленного применения. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию многослойных систем, изучение влияния наноструктуры на долговечность и разработку адаптивных покрытий для эксплуатации [32, 33].

Выводы по главе 2

1. Влияние химического состава сталей на их износостойкость:

Химический состав стали является определяющим фактором для формирования микроструктуры и комплекса механических свойств (твердость, прочность, ударная вязкость), которые напрямую определяют ее износостойкость при абразивном, адгезионном и коррозионно-механическом износе [12, 25].

Легирующие элементы (C, Cr, Mo, V, W) играют ключевую роль: углерод и хром способствуют образованию твердых карбидов (Cr_7C_3 , VC, WC), что значительно повышает твердость и сопротивление износу. Однако чрезмерное содержание углерода и хрома снижает пластичность и ударную вязкость, повышая склонность к хрупкому разрушению [25].

Система «сталь Л53 + наплавка Сормайт» является эффективным примером композиционного подхода. Сталь Л53 обеспечивает высокую прочность и вязкость основы, а наплавка Сормайтом, содержащая высокие

концентрации Cr, C и W, создает износостойкий поверхностный слой с твердостью до 65 HRC [16].

Экспериментальные данные подтверждают, что наплавка Сормайтом снижает интенсивность абразивного износа, стали Л53 в 3–5 раз, что ведет к увеличению срока службы деталей в 2,5–3 раза в реальных условиях эксплуатации [16, 25].

2. Влияние термической обработки на механические свойства сталей:

Термическая обработка, особенно вакуумная, является важным этапом для достижения оптимального баланса механических свойств в композиционных системах. Вакуумная обработка исключает окисление и обезуглероживание, обеспечивая качество поверхности и контроль процесса [70].

Для системы Л53+Сормайт оптимальным режимом является вакуумная закалка с последующим низкотемпературным отпуском (200–300 °С). Этот режим позволяет достичь высокой твердости (45–50 HRC для основы, 60–65 HRC для наплавки) и прочности за счет мартенситного превращения и измельчения зерна [57, 70].

Ключевая задача термообработки — снятие остаточных напряжений, возникающих из-за разницы в коэффициентах теплового расширения основного металла и наплавки. Низкотемпературный отпуск способствует частичному распаду мартенсита, выделению дисперсных карбидов и стабилизации остаточного аустенита, что повышает ударную вязкость и стабильность свойств [57].

Слишком высокая скорость охлаждения приводит к нежелательным явлениям: образованию грубых карбидов по границам зерен, повышению хрупкости и снижению ударной вязкости. Точное соблюдение режимов (температура, время выдержки, скорость охлаждения) с помощью компьютерного управления является обязательным условием для получения качественного и надежного соединения [57, 70].

3. Эксплуатационные факторы, влияющие на износ рабочих органов почвообрабатывающих машин:

Износ рабочих органов — это сложный многофакторный процесс, вызванный совокупным воздействием абразивного, адгезионного, коррозионного и усталостного износа [34, 86, 101].

Основными факторами являются свойства почвы (тип, содержание абразивных частиц, влажность, плотность) и режимы работы машины (скорость движения, глубина обработки, усилие). Например, песчаные почвы с высоким содержанием кварца обладают максимальной абразивностью, а оптимальная влажность для минимизации износа составляет 15–25% [11].

Для борьбы с износом необходимо комплексное решение, включающее выбор износостойких материалов (легированные стали), применение упрочняющих покрытий (WC, TiN), оптимизацию конструкции рабочих органов (форма, угол наклона) и использование современных технологий восстановления (электродуговая, лазерная наплавка) [16, 89, 113].

Автоматизация и мониторинг состояния оборудования позволяют прогнозировать износ и проводить профилактическое обслуживание, что снижает эксплуатационные затраты и повышает общую эффективность сельскохозяйственных работ [34, 36, 37].

4. Обзор методов синтеза упрочняющих покрытий, напыляемых вакуумным методом:

Вакуумные методы нанесения покрытий (PVD, CVD, ионно-плазменное напыление) позволяют создавать высококачественные, чистые и контролируемые по составу и структуре упрочняющие слои.

На основе сравнительного анализа (микроструктура, твердость, износостойкость, коррозионная стойкость) нитрид титана был обоснован как оптимальный выбор для упрочнения наплавки Сормайт на стали Л53.

TiN обладает высокой твердостью (20–30 ГПа), отличной коррозионной стойкостью (благодаря пассивирующему слою TiO_2), низким коэффициентом трения и хорошей адгезией к металлическим подложкам при нанесении методами PVD.

Предложена эффективная технологическая цепочка: наплавка Сормаита на сталь Л53 → ионная очистка → магнетронное осаждение TiN → вакуумный отжиг при 500 °С. Отжиг необходим для снятия остаточных напряжений, возникающих из-за разницы в коэффициентах теплового расширения, без разупрочнения основного материала.

Общее заключение по главе 2: Достижение высокой износостойкости и долговечности деталей из стали Л53 требует системного подхода, объединяющего оптимизацию химического состава, применение композиционных технологий (наплавка), точное управление термической обработкой и нанесение современных вакуумных покрытий. Предложенная цепочка «Л53 → Сормайт → TiN → отжиг» представляет собой перспективное решение для создания долговечных рабочих органов сельскохозяйственной техники, способных эффективно работать в экстремальных условиях. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку многослойных и наноструктурированных покрытий, а также на применение математического моделирования для оптимизации всех этапов технологического процесса.

ГЛАВА 3. МАТЕРИАЛЫ, ПРОГРАММА И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Материалы исследования

Материалы исследования, использованные в рамках данного научного эксперимента, были тщательно отобраны и подготовлены с учетом их практического применения в сельскохозяйственном машиностроении, а также с целью обеспечения максимальной репрезентативности и воспроизводимости результатов. В качестве основного объекта исследования были выбраны серийно выпускаемые плужные лемехи модели ПЛЖ-31-702, оснащенные ребром жесткости — конструктивным элементом, придающим изделию повышенную устойчивость к изгибающим нагрузкам по сравнению с традиционными листовыми лемехами, лишенными такого усиления. Такой выбор обусловлен не только распространенностью данной модели в аграрном секторе, но и ее высокой чувствительностью к абразивному износу, что делает ее идеальным кандидатом для испытания новых методов поверхностного упрочнения. Геометрические параметры исследуемого лемеха строго соответствуют заводским спецификациям: общая длина изделия составляет 545 миллиметров, толщина металла по верхней кромке — 10 миллиметров, а в зоне ребра жесткости — увеличена до 14 миллиметров, что обеспечивает дополнительную механическую прочность в наиболее нагруженных участках конструкции. Для проведения лабораторных испытаний и последующего металлографического, структурного и механического анализа из наиболее критичной и подверженной износу зоны — лезвийной части лемеха, где нанесена наплавка Сормайтотом, с соблюдением всех требований к сохранению исходной микроструктуры, изготовлены плоские образцы стандартных размеров 20 на 30 миллиметров, которые послужили основой для всех последующих процедур, включая вакуумный отжиг и измерение микротвердости.

Химический состав как основного материала, так и наплавочного слоя строго регламентирован государственными и отраслевыми стандартами, поскольку именно химический состав в решающей степени определяет физико-механические свойства, износостойкость и поведение материала при термической обработке. Основной материал — специальная лемешная сталь марки Л-53 — представляет собой высококачественную конструкционную сталь с четко заданным интервалом содержания ключевых легирующих и сопутствующих элементов: содержание углерода (C) варьируется в пределах от 0,47% до 0,57%, что обеспечивает необходимый баланс между твердостью и вязкостью; марганец (Mn) присутствует в концентрации от 0,50% до 0,80% и способствует повышению прочности и прокаливаемости; кремний (Si) в количестве от 0,15% до 0,35% выполняет функцию раскислителя и дополнительно упрочняет ферритную матрицу; содержание вредных примесей, таких как сера (S) и фосфор (P), строго ограничено и не должно превышать 0,05% и 0,04% соответственно, чтобы минимизировать склонность стали к хрупкому разрушению и старению; основу сплава, естественно, составляет железо (Fe), на долю которого приходится подавляющая часть массы. Наплавочный материал — Сормайт — представляет собой высокоуглеродистый хромистый сплав, специально разработанный для работы в условиях интенсивного абразивного износа [25, 92, 93, 116]. Его химический состав кардинально отличается от состава основной стали: содержание хрома (Cr) достигает 25–31%, что обеспечивает исключительную коррозионную стойкость и формирование твердых карбидных фаз; никель (Ni) в количестве 3–5% повышает вязкость и устойчивость к ударным нагрузкам; углерод (C) содержится в очень высокой концентрации — от 2,5% до 3,3% — что необходимо для образования большого объема карбидов хрома, отвечающих за высокую твердость; кремний (Si) присутствует в еще большем количестве — от 2,8% до 3,5% — и способствует раскислению расплава при наплавке; марганец (Mn) ограничен концентрацией не более 1,5%; содержание серы (S) и фосфора (P) также строго контролируется и не должно превышать

0,07% и 0,08% соответственно; основой сплава, как и в случае со сталью Л-53, является железо (Fe). Такое сочетание материалов — пластичная и прочная сталь Л-53 в качестве основы и чрезвычайно твердый, но хрупкий Сормайт в качестве поверхностного слоя — создает композитную структуру, в которой каждый компонент выполняет свою функцию: основной металл обеспечивает общую прочность и гасит ударные нагрузки, а наплавка противостоит абразивному износу. Именно взаимодействие этих двух материалов, их совместная работа и процессы, происходящие на границе их раздела при термической обработке, и стали центральным объектом данного исследования, целью которого было не просто изучить каждый материал по отдельности, но понять и оптимизировать процессы, происходящие в зоне их контакта, для достижения долговечности и эффективности всего изделия в целом.

3.2. Программа проведения испытаний

Программа проведения испытаний была разработана как логически выстроенная последовательность этапов, направленная на всестороннюю оценку эффективности предложенной технологии комплексного упрочнения плужных лемехов из стали Л53. Исследование начиналось с фундаментального анализа структурных и фазовых изменений, инициированных вакуумным отжигом. Для этого из наиболее критичной, лезвийной части серийных лемехов ПЛЖ-31-702, уже имеющих наплавку Сормайтом, изготавливали плоские образцы размером 20×30 мм. Эти образцы подвергали термической обработке в вакуумной печи СШВЭ-1.2 при температуре 1000°С с варьируемым временем выдержки — 60, 180 и 300 минут — при остаточном давлении $(2-7) \times 10^{-5}$ Торр. Целью этого этапа было детально изучить кинетику формирования диффузионной зоны, процессы сфероидизации хрупких фаз и дисперсионного упрочнения за счет выделения мелкодисперсных карбидов, что являлось основой для оптимизации механических свойств композитной системы.

После определения оптимального режима вакуумного отжига (180 минут при 1000°C) следующим шагом стало нанесение функционального покрытия из нитрида титана (TiN). Для этого использовали высокотехнологичную вакуумную установку "Булат-300", работающую по методу магнетронного распыления (PVD). Процесс включал в себя тщательную подготовку поверхности, ионную очистку в аргоновой плазме и собственно осаждение покрытия толщиной 3,5 мкм при строго контролируемых параметрах: давлении 0,5-1,0 Па, температуре подложки 200°C и мощности разряда 4 кВт. Завершающим этапом технологической цепочки стал финишный стабилизирующий отжиг при 500°C в течение 180 минут, направленный на снятие остаточных напряжений в покрытии и улучшение его адгезии к подложке.

Для комплексной оценки полученной многослойной структуры «сталь Л53 — Сормайт — TiN» применяли широкий спектр аналитических методов. Металлографический анализ с использованием микроскопа NEOPHOT-32 и программного обеспечения ImageJ позволил визуализировать и количественно оценить микроструктуру, размер зерна и толщину диффузионной зоны. Рентгеноструктурный анализ на дифрактометре ДРОН-4 с Cu-K α излучением был направлен на идентификацию фаз, определение параметров кристаллической решетки и оценку микродеформаций. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) на приборе LEO 1430 VP с детектором обратно рассеянных электронов обеспечила высокодетальное изображение границы раздела фаз и позволила оценить морфологию карбидов и однородность структуры. Параллельно проводили измерения микротвердости на приборе ПМТ-3, что дало количественную оценку изменения твердости в зависимости от режимов термической обработки и глубины проникновения индентора.

Особое внимание уделяли оценке коррозионной стойкости в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации. Была разработана микроскопическая модель, позволяющая прогнозировать

скорость коррозионного износа в зависимости от степени засоленности почвы, ширины диффузионной зоны и твердости материала. Эта модель позволила не только оценить долговечность, но и выявить важный параметр — оптимальное время финишного отжига при 500°C, равное 180 минутам, при котором достигается максимальная защита от коррозии.

Завершающим и наиболее значимым этапом программы стали полевые испытания, проведенные на опытном поле в Краснодарском крае. В ходе этих испытаний опытные лемехи с комплексным упрочнением агрегатировались с плугом ПЛН-3-35 на тракторе МТЗ-82 и эксплуатировались в типичных для региона условиях: на серой лесной почве плотностью 1,45 г/см³ и влажностью 22%. Ключевым методом оценки износостойкости в полевых условиях стал высокоточный метод измерения потери массы лемехов после обработки каждые 50 гектаров. Полученные данные обрабатывали по адаптированной методике Тикалова–Ефремова, где в качестве базовой единицы измерения использовали обработанную площадь в гектарах, что позволило рассчитать такие ключевые показатели, как интенсивность изнашивания, абсолютная и относительная износостойкость. Этот 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.

3.3 Методы термической обработки для упрочнения композитных материалов

Упрочняющая термическая обработка, или термическое упрочнение, представляет собой комплекс строго регламентированных технологических операций, направленных на кардинальное изменение внутренней структуры металлов и сплавов для достижения ими высокого уровня механических и эксплуатационных свойств. К этим критически важным для ответственных деталей свойствам относятся, прежде всего, износостойкость, твердость,

ударная вязкость и адгезия защитных покрытий, которые в совокупности определяют ресурс изделия в условиях интенсивных механических и термических нагрузок. Особую сложность, многогранность и практическую значимость этот процесс приобретает при работе с гетерогенными композитными материалами, где конечный результат определяется не просто свойствами каждого изолированного компонента, но в первую очередь характером их физико-химического и механического взаимодействия на границе раздела фаз. Ярким и технологически сложным примером такого композита является конструкционная сталь Л-53, упрочненная наплавкой Сормайт — высокоуглеродистым и высоколегированным сплавом на основе хрома и железа, используемым для повышения износостойкости быстроизнашивающихся деталей сельскохозяйственной техники, таких как лемехи плугов, отвалы, зубья борон и другие почвообрабатывающие органы, работающие в условиях абразивного износа и переменных ударных нагрузок.

Эффективность и долговечность упрочнения такого сложного композита являются производными от множества взаимосвязанных факторов. К ним относятся исходная микроструктура и химический состав основного металла, определяющие его прочностные и пластические характеристики; фазовый состав и дисперсность структурных составляющих в наплавленном слое Сормайта, ответственные за непосредственное сопротивление износу; степень и глубина взаимной диффузии легирующих элементов, прежде всего углерода и хрома, через границу раздела «сталь – наплавка», формирующая переходную зону и обеспечивающая прочное сцепление; а также наличие и распределение технологических дефектов, таких как оксидные пленки, шлаковые включения, поры и значительные остаточные напряжения, возникающие в процессе самой наплавки вследствие термической деформации и неравномерного охлаждения. Для целенаправленного управления этими параметрами, минимизации дефектов и оптимизации структуры применяется *precisely* разработанная многоступенчатая

термическая обработка, программа которой тщательно рассчитывается и последовательно выполняется для достижения заданного комплекса свойств.



Рисунок 3.1. – Подготовленные образцы с выраженной зоной наплавки износостойкого сплава

Любое серьёзное исследование или технологический процесс начинаются с этапа подготовки, от корректности которого во многом зависит конечная результативность всей работы. В данном случае оно начинается с тщательного отбора и подготовки репрезентативных образцов. Из наиболее критичной к износу лезвийной части серийных лемехов ПЛЖ-31-702, уже имеющих наплавку Сормайтом, вырезаются плоские заготовки стандартного размера 20×30 мм, что позволяет унифицировать дальнейшие операции и проводить сравнительный анализ. Данные заготовки проходят обязательную механическую очистку для удаления всех поверхностных загрязнений, окалины и следов коррозии, а также тщательную маркировку для исключения путаницы на последующих этапах. Эта процедура обеспечивает получение однородного, чистого и идентичного материала для последующих термообрабатывающих операций и последующего точного металлографического и трибологического анализа, гарантируя репрезентативность и достоверность получаемых данных.

Первым и безусловно ключевым этапом всего процесса термического упрочнения данного композитного материала является вакуумный отжиг, выполняемый при высоких температурах. Этот процесс проводили в

специализированной печи СШВЭ-1.2, оснащенной вольфрамовыми нагревателями, позволяющими достигать высоких температур в строго контролируемой среде. Главной особенностью и преимуществом такой печи является возможность создания и поддержания глубокого высокого вакуума с остаточным давлением в диапазоне $(2-7) \times 10^{-5}$ Торр, что практически полностью исключает окисление поверхности образца и выгорание легирующих элементов, что происходило бы в воздушной или даже в инертной атмосфере с остаточным кислородом. Выбранный режим обработки — нагрев до 1000 °С (что составляет примерно 65% от абсолютной температуры плавления стали, обеспечивал необходимую диффузионную подвижность атомов без риска пережога или оплавления) с критически важной выдержкой в течение 127 минут — не является произвольным; он был установлен и теоретически обоснован на основе предварительных исследований как оптимальный и сбалансированный для данной марки стали Л-53 и химического состава наплавки Сормайт, обеспечивающий протекание всех необходимых структурных превращений.



Рисунок 3.2. – Печь СШВЭ-1.2 для вакуумного отжига

Физическая сущность и металлургическая основа этого сложного высокотемпературного процесса заключаются в следующем: интенсивный нагрев до столь высокой температуры в условиях глубокого вакуума выступает в роли мощного активатора, резко увеличивающего кинетику всех диффузионных процессов. Атомы углерода и ключевых легирующих элементов, прежде всего хрома и железа, приобретают достаточную энергию для активного перемещения из зоны наплавки, где их концентрация крайне высока, в приграничный объем основного металла. В результате этого направленного массопереноса на границе раздела фаз формируется прочная, плавно изменяющаяся по составу диффузионная зона, достигающая толщины около 200 мкм, которая играет роль своего рода буфера или промежуточного слоя, обеспечивающего плавный переход механических свойств и надежно предотвращающего возможность отслоения хрупкой наплавки при ударных и знакопеременных нагрузках в процессе эксплуатации. Параллельно с этим высокотемпературное воздействие приводит к процессу дробления и сфероидизации крупных, хрупких первичных карбидов типа $(Cr,Fe)_7C_3$, которые образуются при быстром охлаждении после наплавки. Эти карбиды измельчаются и получают дисперсное, равномерное распределение в металлической матрице наплавки, создавая тем самым эффект дисперсионного упрочнения — один из самых эффективных механизмов повышения твердости и износостойкости. Вакуумная среда способствует активному восстановлению оксидов и удалению с поверхности остаточных шлаковых включений, очищая металл. Совокупность этих фундаментальных структурных изменений приводит к значительному и стабильному повышению микротвердости наплавленного слоя. После завершения выдержки крайне важно контролировать и процесс охлаждения: образцы охлаждаются в самой вакуумной среде с заданной, относительно невысокой скоростью 20 °С/мин, что позволяет минимизировать возникновение новых опасных термических напряжений, связанных с быстрым и неравномерным охлаждением, сохранив при этом достигнутую мелкодисперсную структуру.

3.4 Методика получения покрытия из нитрида титана



Рисунок 3.3. – Вакуумная установка для получения тонкоплёночных покрытий из нитрида титана. Общий вид сбоку (а) и система насосов с газовыми магистралями на задней панели камеры (рис. б).

Вакуумная установка, изображённая на рисунке 3.3, представляет собой высокотехнологичную систему, предназначенную для получения функциональных тонкоплёночных покрытий, в частности — нитрида титана (TiN), методом КИБ в условиях высокого и сверхвысокого вакуума [133,134]. Нитрид титана — один из наиболее востребованных материалов в современной промышленности благодаря своим уникальным свойствам: высокой твёрдости (до 2500 HV), износостойкости [25, 28, 38, 116], коррозионной стойкости, химической инертности, декоративному золотистому цвету и высокой температуре плавления (около 2930 °C). Он применяется в инструментальной промышленности (режущий и штамповый инструмент) [64, 65], микроэлектронике (контактные слои, барьерные слои), медицине (имплантаты, хирургические инструменты) и декоративных покрытиях (часы, ювелирные изделия).

Установка состоит из нескольких функциональных блоков: основной вакуумной камеры, системы насосов, магнетронных источников, системы подачи газов, системы нагрева подложек, системы управления и диагностики. Камера выполнена из нержавеющей стали с высокой степенью полировки внутренних поверхностей, что минимизирует десорбцию газов и загрязнение осаждаемых плёнок. На корпусе камеры размещены фланцы для подключения насосов, газовых магистралей, электрических вводов, а также окна для

визуального наблюдения и оптической диагностики процесса. Люки доступа обеспечивают возможность загрузки-выгрузки подложек и обслуживания внутренних компонентов.

Система откачки состоит из трёхступенчатой насосной станции: механический насос (предварительная откачка до 10^{-1} Па), турбомолекулярный насос (основная откачка до 10^{-5} Па) и, при необходимости, ионный насос (для достижения УВВ — 10^{-8} – 10^{-10} Па). Такая конфигурация позволяет не только эффективно удалять атмосферные газы перед началом процесса, но и поддерживать стабильное давление в рабочей зоне во время осаждения. Особенно важно это при получении TiN, так как даже малые примеси кислорода или воды могут привести к образованию оксидов титана, что снижает качество покрытия [31, 33].

Магнетронный источник представляет собой катод, на который нанесена мишень из чистого титана. Катод помещён в магнитное поле, создаваемое постоянными магнитами или электромагнитами, что позволяет локализовать плазму вблизи поверхности мишени и увеличить эффективность распыления. Подача рабочего газа — аргона — обеспечивает ионизацию и поддержание плазмы, а подача реактивного газа — азота — позволяет синтезировать нитрид титана в процессе осаждения. Соотношение Ar:N₂, давление в камере, мощность разряда, температура подложки и расстояние до мишени — ключевые параметры, определяющие структуру, морфологию и свойства получаемого покрытия [31, 33, 34, 35].

Система управления включает компьютерный блок с программным обеспечением, которое позволяет задавать и контролировать все параметры процесса в реальном времени. Данные с датчиков давления, температуры, масс-спектрометра и оптических зондов поступают в систему, где обрабатываются и используются для автоматической коррекции режима. Это особенно важно при получении многослойных или градиентных покрытий, где требуется высокая стабильность и повторяемость [36, 37].

С точки зрения классической физики, процесс получения TiN можно разделить на несколько последовательных этапов:

Создание вакуума и подготовка камеры. Перед началом процесса камера откачивается до базового давления (обычно 10^{-5} Па и ниже), чтобы минимизировать концентрацию остаточных газов, особенно кислорода и водяного пара. Затем подложки могут подвергаться предварительному нагреву (до 300–500 °C) для удаления адсорбированных слоёв и активации поверхности. Этот этап описывается уравнением десорбции:

$$Q = A \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \quad (22)$$

где (Q) — скорость десорбции (молекул/с·см²), (A) — предэкспоненциальный множитель, (E_d) — энергия активации десорбции, (k) — постоянная Больцмана, (T) — температура подложки.

Нагрев позволяет снизить адсорбционную ёмкость поверхности, что критично для получения чистых и плотных плёнок [31-33].

Ионизация газа и создание плазмы. После ввода аргона и азота в камеру до рабочего давления (обычно 0,5–5 Па) на магнетрон подаётся напряжение, создающее электрический разряд. Электроны, ускоренные электрическим полем, сталкиваются с атомами газа, вызывая их ионизацию. Процесс описывается уравнением Таунсенда:

$$\alpha = \frac{A_p}{\exp(B_p / E)} \quad (23)$$

где (α) — первый коэффициент Таунсенда (число ионизаций на единицу длины), (p) — давление газа, (E) — напряжённость электрического поля, (A) и (B) — эмпирические константы, зависящие от газа.

Магнитное поле удерживает электроны вблизи мишени, увеличивая вероятность ионизационных столкновений и плотность плазмы.

Распыление мишени. Ионы аргона, ускоренные в катодном падении потенциала, бомбардируют мишень из титана, выбивая атомы титана с её поверхности. Этот процесс называется катодным распылением и описывается

теорией Спенсера-Сигмунда. Количество выбитых атомов на один ион определяется коэффициентом распыления (S):

$$S(E) = \frac{Y_0 \times E}{E + U_0} \quad (24)$$

где (E) — энергия иона, (U_0) — пороговая энергия распыления (~20–30 эВ для титана), (Y_0) — максимальный выход распыления.

Распылённые атомы титана движутся в направлении подложки, сталкиваясь с молекулами газа. При низких давлениях движение происходит практически без столкновений (режим свободного пробега), при высоких — с множественными столкновениями, что влияет на энергию и угол прилёта частиц [10].

Реакция с азотом и осаждение плёнки. Атомы титана, движущиеся в газовой фазе, сталкиваются с молекулами азота, образуя активные радикалы и ионы TiN_x . Эти частицы осаждаются на подложке, где происходит их диффузия, рекомбинация и формирование кристаллической решётки. Скорость осаждения (R) может быть выражена как:

$$R = \frac{J \times \cos(\theta)}{n \times \rho} \quad (25)$$

где (J) — поток частиц на подложку (атомов/с·см²), (θ) — угол падения, (n) — плотность упаковки атомов в плёнке, (ρ) — плотность материала.

Температура подложки играет ключевую роль: при низких температурах плёнка аморфна и пориста, при высоких — формируется кристаллическая структура с высокой плотностью [23, 31, 33].

Рост плёнки и формирование структуры. Рост плёнки описывается моделями Волмера-Вебера (островковый рост), Франка-ван дер Мерве (слоистый рост) или Странски-Крастанова (смешанный рост). Для TiN при оптимальных условиях реализуется слоистый рост, что обеспечивает гладкую поверхность и высокую адгезию. Кристаллическая структура TiN —

кубическая (NaCl-тип), параметр решётки $\sim 4,24$ Å. Ориентация кристаллитов зависит от температуры, давления и состава газовой смеси [32, 33].

Квантово-механическая модель процесса осаждения нитрида титана. На микроуровне процесс формирования TiN требует рассмотрения с позиций квантовой механики, поскольку взаимодействие атомов титана и азота, формирование химических связей и кристаллической решётки определяются электронной структурой и волновыми функциями частиц.

Электронная структура титана и азота. Титан (атомный номер 22) имеет электронную конфигурацию $3d^2 4s^2$. При распылении атомы теряют валентные электроны, становясь ионами Ti^+ , Ti^{2+} и т.д. Азот (атомный номер 7) — $2s^2 2p^3$ — стремится принять три электрона для заполнения внешней оболочки. При взаимодействии Ti и N происходит перенос электронов от титана к азоту, формируя ионную связь, однако из-за частичного перекрытия орбиталей возникает и ковалентная составляющая. Это описывается методом молекулярных орбиталей (МО):

$$\Psi_{\text{связывающая}} = c_1 f_{Ti} + c_2 f_N \quad (26)$$

где (ϕ_{Ti}) и (ϕ_N) — атомные орбитали, (c_1, c_2) — коэффициенты, определяемые из решения уравнения Шрёдингера.

Энергия связи Ti-N составляет $\sim 5,5$ эВ, что обеспечивает высокую прочность соединения [12].

Потенциал взаимодействия и силы связи. Потенциал взаимодействия между атомами Ti и N может быть описан потенциалом Морзе:

$$V(r) = D_e [1 - \exp(-a(r - r_e))]^2 \quad (27)$$

где (D_e) — глубина потенциальной ямы (энергия диссоциации), (r_e) — равновесное расстояние между атомами ($\sim 1,9$ – $2,1$ Å), (a) — параметр, определяющий крутизну потенциала.

При осаждении на подложке атомы занимают положения, минимизирующие потенциальную энергию системы, что приводит к формированию упорядоченной решётки.

Формирование кристаллической решётки и зонная структура. При осаждении на подложке атомы Ti и N образуют периодическую структуру с пространственной группой Fm3m. Расчёты методом функционала плотности (DFT) показывают, что ширина запрещённой зоны TiN составляет ~2,5–3,0 эВ, что делает его полупроводником с металлической проводимостью из-за частичного заполнения d-зон. Плотность состояний показывает пики в районе Ферми-уровня, что объясняет высокую электропроводность и отражающую способность [9].

Диффузия и релаксация на поверхности. После осаждения атомы обладают избыточной энергией и совершают поверхностную диффузию, описываемую уравнением Аррениуса:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (28)$$

где (D) — коэффициент диффузии, (D_0) — предэкспоненциальный множитель, (E_a) — энергия активации диффузии (~0,5–1,5 эВ для TiN).

Диффузия позволяет атомам находить энергетически выгодные позиции, что способствует росту крупных зёрен и снижению внутренних напряжений [31, 33].

Квантовые эффекты при наномасштабном росте. При толщинах плёнок менее 10 нм проявляются квантовые размерные эффекты: изменение ширины запрещённой зоны, квантование энергетических уровней, туннелирование электронов. Это особенно важно при создании многослойных наноструктур, например, TiN/TiAlN, где каждый слой имеет толщину 2–5 нм. В таких системах возникают интерфейсные состояния, влияющие на механические и электрические свойства [9, 27].

Для полного описания процесса осаждения TiN используется система уравнений, объединяющих газодинамику, электродинамику, кинетику плазмы и рост плёнки.

1. Уравнение переноса частиц в газовой фазе:

$$\frac{dn_i}{dt} + \tilde{N} \times (n_i \vec{v}_i) = S_i - R_i \quad (29)$$

где (n_i) — концентрация i -го компонента (Ti, N, Ar), $(\vec{v}_i)$ — его скорость, (S_i) — источники (распыление, ионизация), (R_i) — стоки (рекомбинация, осаждение) [34, 35].

2. Уравнение энергии частиц:

$$\frac{dE}{dt} = - \sum_j \sigma_{ij} n_j v_{ij} \Delta E_{ij} \quad (30)$$

где (σ_{ij}) — сечение столкновения, (v_{ij}) — относительная скорость, (ΔE_{ij}) — переданная энергия.

3. Модель роста плёнки — уравнение Каллендера-Кинга:

$$\frac{dh}{dt} = \alpha F \exp\left(-\frac{E_b}{kT}\right) \quad (31)$$

где (h) — толщина плёнки, (α) — коэффициент прилипания, (F) — поток частиц, (E_b) — энергия связи на поверхности [10].

4. Модель напряжений в плёнке — уравнение Стоунера-Вулмера:

$$\sigma = \frac{E}{1 - \nu} \times \frac{\Delta a}{a_0} \quad (32)$$

где (σ) — внутреннее напряжение, (E) — модуль Юнга, (ν) — коэффициент Пуассона, (Δa) — несоответствие параметров решётки плёнки и подложки, (a_0) — параметр решётки подложки [50, 99].

5. Кинетика химической реакции — уравнение Аррениуса для образования TiN:

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (33)$$

где (k) — константа скорости реакции, (R) — универсальная газовая постоянная [31, 33].

Влияние параметров процесса на свойства покрытия

— Давление в камере: при низком давлении ($< 0,5$ Па) частицы имеют высокую энергию, плёнка плотная, но может иметь высокие напряжения; при высоком давлении (> 3 Па) энергия частиц снижается, плёнка пористая, но с меньшими напряжениями [33, 35].

—*Соотношение $Ar:N_2$* : при избытке азота образуется стехиометрический TiN, при недостатке — обогащённый титаном (TiN_x , $x < 1$), что снижает твёрдость [31, 33].

—*Температура подложки*: определяет степень кристалличности, размер зёрен, адгезию. Оптимальная температура — 500 °С [31, 32, 33].

—*Мощность разряда*: влияет на скорость распыления и энергию частиц. Слишком высокая мощность может привести к перегреву мишени и подложки [9].

—*Расстояние до мишени*: определяет угол осаждения и однородность покрытия. Оптимальное расстояние — 10–20 см [33, 35].

3.5 Методика проведения металлографического анализа

Проведение металлографического анализа образцов стали Л53 с наплавкой сормайтотом и покрытием из нитрида титана с использованием металлографического микроскопа NEOPHOT-32 и программного обеспечения ImageJ представляет собой многоэтапную процедуру, требующую строгого соблюдения методологических принципов, точной калибровки оборудования и корректного математического описания измеряемых параметров — в частности, среднего размера зерна и толщины диффузионной зоны. Ниже приводится подробная методика, включающая как практические шаги, так и математические выкладки, обеспечивающие воспроизводимость, точность и научную обоснованность результатов.

Подготовка образцов. Перед началом анализа образцы подвергаются стандартной металлографической подготовке: отрезка, врезка в эпоксидную смолу (при необходимости), последовательная механическая шлифовка с использованием абразивных бумаг различной зернистости (от 80 до 2000), полировка на тканях с алмазными суспензиями (3 мкм, 1 мкм, 0.25 мкм), окончательная полировка на коллоидной окиси хрома или окиси алюминия для достижения зеркальной поверхности. После полировки образцы подвергаются травлению — для стали Л53 и Сормайтот применяется реактив

Кроля (5 мл HNO_3 , 10 мл HCl , 85 мл H_2O) или 2–4% раствор пикриновой кислоты в этаноле, что позволяет выявить границы зерен и структурные составляющие. Для визуализации диффузионной зоны на границе с нитридом титана может потребоваться дополнительное травление в реактиве Мураками (10 г KOH , 10 г $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$, 100 мл H_2O) или в 10% растворе щавелевой кислоты при электролитическом травлении. Качество травления контролируется визуально под микроскопом при малом увеличении — структура должна быть четко выражена без перетравливания или недотравливания.

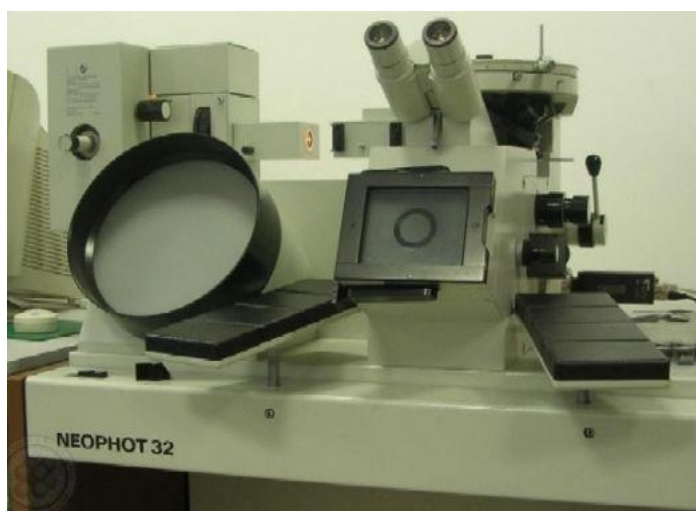


Рисунок 3.4. – Металлографический микроскоп NEOPHOT-32 с установленной цифровой камерой и калибровочной шкалой

Настройка и калибровка микроскопа NEOPHOT-32.

Металлографический микроскоп NEOPHOT-32 изображенный на рис. 3.4 оснащен объективами с фиксированными увеличениями (обычно 5×, 10×, 20×, 50×, 100×), окулярами (10×), и возможностью подключения цифровой камеры. Перед началом анализа выполняли калибровку микроскоп-камеры-ПО связки. Для этого использовали калибровочную решетку (например, микрометрическая шкала с шагом 10 мкм). Изображение шкалы снимали при каждом используемом увеличении, затем в ImageJ проводили калибровку: Tools → Set Scale → вводится известное расстояние (например, 100 мкм), указывается единица измерения (micron), и ставится галочка “Global”, чтобы

калибровка применялась ко всем последующим изображениям при том же увеличении. Математически калибровка описывается линейным преобразованием:

$$x_{\text{реал}} = k \times x_{\text{пикс}}, \quad (34)$$

где ($x_{\text{реал}}$) — реальное расстояние в микрометрах, ($x_{\text{пикс}}$) — расстояние в пикселях на изображении, ($k = \frac{L_{\text{известное}}}{N_{\text{пикс}}}$) — калибровочный коэффициент, определяемый как отношение известной длины ($L_{\text{известное}}$) (в мкм) к количеству пикселей ($N_{\text{пикс}}$), которые она занимает на изображении.

Этот коэффициент зависит от увеличения микроскопа и разрешения камеры и должен быть рассчитан и зафиксирован для каждого объектива.

Для анализа размера зерна снимаются микрофотографии в проходящем или отраженном свете (в зависимости от режима микроскопа) при увеличении, обеспечивающем достаточное разрешение для визуализации границ зерен — обычно 200×–500×. Рекомендуется делать не менее 5–7 снимков с разных участков образца для обеспечения репрезентативности выборки. Для стали Л53 с Сормайтом границы зерен должны быть четко выявлены травлением [12, 57]. Изображения сохраняются в несжатом формате (TIFF или PNG) с максимальным разрешением камеры.

В ImageJ анализ размера зерна может быть выполнен несколькими способами, но наиболее строгим и стандартизированным является метод линейных пересечений (linear intercept method), соответствующий ASTM E112. Метод основан на подсчете числа пересечений случайной линии с границами зерен. Средняя длина отрезка, приходящегося на одно зерно, обратно пропорциональна плотности границ.

Пусть на изображении проведена прямая линия длиной (L) (в мкм). Эта линия пересекает (N) границ зерен. Тогда среднее число пересечений на единицу длины:

$$P_L = \frac{N}{L} \quad [\text{пересечений/мкм}]. \quad (35)$$

Согласно стереологическому принципу, для изотропной структуры средний линейный размер зерна ($\bar{d}$) связан с (P_L) соотношением:

$$\bar{d} = \frac{1}{P_L}. \quad (36)$$

Однако, поскольку каждое зерно пересекается дважды (вход и выход), а также с учетом поправки на двумерное сечение трехмерной структуры, применяется множитель 1.5 (для эквивалентных сферических зерен):

$$\bar{d} = \frac{1.5}{P_L} = \frac{1.5 \times L}{N}. \quad (37)$$

Для повышения точности в ImageJ используется инструмент “Straight Line”, после чего применяется плагин “Analyze → Analyze Particles” или вручную с помощью “Multi-point Tool” отмечаются точки пересечения. Более эффективно — использовать автоматизированный подход: изображение конвертируется в бинарное (Image → Adjust → Threshold), границы зерен выделяются (Process → Binary → Outline), затем накладывается сетка из параллельных линий (Analyze → Tools → ROI Manager → Draw Grid), и подсчитывается общее число пересечений (N_{total}) для всех линий общей длиной (L_{total}). Тогда:

$$\bar{d} = \frac{1.5 \times L_{\text{total}}}{N_{\text{total}}}. \quad (38)$$

Для всей выборки (несколько изображений) вычисляется средневзвешенное значение:

$$\bar{d}_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^m L_i}{\sum_{i=1}^m N_i} \times 1.5, \quad (39)$$

где (m) — количество изображений, (L_i) и (N_i) — длина линии и число пересечений на i -м изображении.

Стандартное отклонение размера зерна:

$$s_d = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (\bar{d}_i - \bar{d}_{\text{avg}})^2}, \quad (40)$$

где ($\bar{d}_i = \frac{1.5 \cdot L_i}{N_i}$) — размер зерна, рассчитанный по i -му изображению.

Для соответствия стандарту ASTM E112, размер зерна также может быть выражен в виде номера зерна (G):

$$G = -\log_2 \frac{\bar{d}}{C} + k, \quad (41)$$

где (C) — константа, зависящая от системы единиц (обычно (C = 1) мм для (d) в мм), (k) — поправочный коэффициент (обычно 3.3219 для перехода от линейного размера к площади на 1 мм²). Более точно:

$$G = 3.3219 \times \log_{10} \frac{N_A}{C} - 2.954, \quad (42)$$

где (N_A) — количество зерен на 1 мм², связанное с ($\bar{d}$) при допущении квадратной формы зерен:

$$N_A = \frac{1}{\bar{d}^2} \quad (\text{в мм}^2, \text{ если } \bar{d} \text{ в мм}). \quad (43)$$

Таким образом, через ($\bar{d}$) (в мкм):

$$G = 3.3219 \times \log_{10} \frac{10^6}{C \bar{d}^2} - 2.954 = 3.3219 \times (6 - 2 \log_{10} \bar{d}) - 2.954. \quad (44)$$

Диффузионная зона (ДЗ) — это область между основным материалом (сталь Л53 или Сормайт) и покрытием из нитрида титана, где происходит взаимная диффузия элементов. Ее толщина определяется как расстояние между внешней границей покрытия и границей, где состав возвращается к составу основы. Визуально ДЗ часто отличается по контрасту, микротвердости или цвету после травления.

На микрофотографиях, полученных при увеличении 500×–1000×, в ImageJ проводится серия перпендикулярных линий от поверхности покрытия до основного материала. Для каждого профиля измеряется расстояние (t_j) от границы TiN до точки, где заканчивается градиент структуры (визуально определяется по изменению контраста или текстуры).

Пусть для одного изображения проведено (n) измерений толщины ($t_1, t_2, \dots, t_n$). Тогда средняя толщина диффузионной зоны на этом изображении:

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^g t_j. \quad (45)$$

Стандартное отклонение:

$$s_t = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^g (t_j - \bar{t})^2}. \quad (46)$$

Для нескольких изображений (k штук) вычисляется общая средняя толщина:

$$\bar{t}_{\text{общ}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \bar{t}_i, \quad (47)$$

и общее стандартное отклонение (с учетом внутри- и межизображенной дисперсии):

$$s_{t,\text{общ}} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_{t,i}^2 + \frac{1}{k(k-1)} \sum_{i=1}^k (\bar{t}_i - \bar{t}_{\text{общ}})^2}. \quad (48)$$

Для повышения точности рекомендуется использовать профиль яркости (Plot Profile в ImageJ): строится интенсивность яркости вдоль линии, перпендикулярной границе. Толщина ДЗ определяется как расстояние между точками, где производная яркости $\left(\frac{dI}{dx}\right)$ достигает локальных экстремумов, соответствующих резким переходам между слоями.

Математически, если $(I(x))$ — функция яркости вдоль оси (x) , то границы ДЗ находятся в точках (x_1) и (x_2) , где:

$$\left| \frac{dI}{dx} \right| \text{® max, при } x \in [x_{\text{ГН}}, x_{\text{основа}}]. \quad (49)$$

Численно производная аппроксимируется конечными разностями:

$$\frac{dI}{dx} \gg \frac{I(x_{i+1}) - I(x_i)}{\Delta x}, \quad (50)$$

где $(\Delta x = k)$ — калибровочный шаг в мкм на пиксель. Границы выбираются как аргументы первого и последнего локального максимума модуля производной на интервале. Тогда:

$$t = |x_2 - x_1|. \quad (51)$$

Этот метод объективизирует выбор границ и минимизирует субъективность оператора.

Статистическая обработка и представление результатов. Все полученные данные сводятся в таблицы и подвергаются статистической обработке. Для размера зерна и толщины ДЗ рассчитываются: среднее арифметическое ($\bar{x}$), стандартное отклонение (σ), коэффициент вариации ($CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\%$), доверительный интервал при заданном уровне значимости ($\alpha = 0.05$):

$$\bar{x} \pm t_{\alpha/2, n} \times \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (52)$$

где ($t_{\alpha/2, n}$) — квантиль t-распределения Стьюдента с ($v = n - 1$) степенями свободы, (n) — объем выборки.

Результаты представляются в виде: “Средний размер зерна: ($\bar{d} = 23.5 \pm 1.7$) мкм (95% CI, $n=15$)”, “Толщина диффузионной зоны: ($\bar{t} = 8.2 \pm 0.9$) мкм (95% CI, $n=20$)”.

Погрешности и источники неопределенности. Основные источники погрешности:

- Субъективность при ручном выборе границ зерен или ДЗ — минимизируется использованием пороговой бинаризации и профилей яркости.
- Неравномерность травления — устраняется повторной подготовкой образца.
- Калибровочная погрешность — уменьшается многократной калибровкой и использованием эталонных шкал.
- Статистическая погрешность — снижается увеличением числа измерений и изображений.

Суммарная стандартная неопределенность (u_c) рассчитывается по формуле:

$$u_c = \sqrt{u_{\text{кал}}^2 + u_{\text{стат}}^2 + u_{\text{суб}}^2}, \quad (53)$$

где ($u_{\text{кал}} = \sigma_k / \sqrt{m_k}$) — неопределенность калибровки (по m_k повторным измерениям шкалы), ($u_{\text{стат}} = \sigma / \sqrt{n}$) — стандартная ошибка

среднего, ($u_{\text{суб}}$) — оценка субъективной погрешности, определяемая по разбросу результатов между разными операторами или методами сегментации.

Представленная методика обеспечивает полный цикл металлографического анализа с математически строгим описанием каждого этапа — от калибровки и получения изображений до статистической обработки и оценки неопределенностей. Использование ImageJ позволяет автоматизировать значительную часть измерений, однако требует корректной настройки параметров сегментации и калибровки. Для образцов стали Л53 с наплавкой Сормайт и покрытием TiN особенно важно тщательно подбирать режимы травления и увеличения, чтобы визуализировать как зеренную структуру, так и тонкую диффузионную зону. Математический формализм, включая стереологические соотношения, численное дифференцирование профилей яркости и статистические критерии, обеспечивает научную воспроизводимость и возможность сопоставления результатов с литературными данными и стандартами. Результаты могут быть использованы для корреляции структурных параметров с механическими свойствами, а также для оптимизации режимов наплавки и нанесения покрытий.

3.6 Методика определения микротвердости

Проведение измерений микротвердости с помощью микротвердомера ПМТ-3 для образцов стали Л53, модифицированных наплавкой Сормайт, представляет собой комплексную, многоступенчатую и глубоко формализованную процедуру, требующую не только строгого соблюдения методологических и технических стандартов, но и глубокого понимания физико-механических процессов, протекающих в материале на микроуровне при локальном контактном взаимодействии с индентором. Микротвердость, в отличие от макротвердости, является локальной характеристикой, отражающей сопротивление материала пластической деформации в пределах объёма, ограниченного несколькими микрометрами в поперечнике и

глубиной, не превышающей долей микрона. Это особенно критично для гетерогенных систем, таких как сталь Л53 с наплавленным слоем Сормайта, где градиенты химического состава, микроструктуры, фазового состояния и механических свойств могут быть значительными даже в пределах единиц микрометров. В таких условиях даже незначительное смещение точки измерения может привести к существенному изменению результата, что требует не только высокой точности позиционирования, но и строгого математического контроля за воспроизводимостью, статистической значимостью и физической интерпретацией полученных данных. Методика, описанная ниже, включает в себя подготовительный этап, собственно процесс индентирования, математическую обработку полученных данных, оценку погрешностей, статистическую валидацию результатов, анализ влияния геометрических и физических факторов, а также корреляцию с микроструктурными особенностями материала, причём каждый шаг сопровождается детальными математическими выкладками, позволяющими не только вычислить численные значения микротвёрдости, но и проанализировать их физическую природу, статистическую устойчивость, границы применимости и корректность в рамках принятых допущений. Особое внимание уделяется вопросам минимизации систематических и случайных погрешностей, а также построению адекватных математических моделей, описывающих распределение твёрдости по глубине и в плоскости образца.

1. Подготовка образцов и настройка прибора ПМТ-3: физические ограничения и математическое описание условий корректности измерений

Перед началом измерений образцы подвергаются последовательной механической шлифовке с использованием серии абразивных бумаг с постепенно уменьшающимся размером зерна — начиная с грубых (Р80–Р120) для удаления грубых дефектов поверхности и заканчивая тонкими (Р1500–Р2000) для получения однородной плоской поверхности. Затем проводится алмазная полировка с применением суспензий с размером частиц 6 мкм, 3 мкм

и, наконец, 1 мкм, что позволяет добиться зеркального блеска поверхности и удалить следы пластической деформации, возникшие в процессе шлифовки. В ряде случаев, особенно при исследовании материалов с высокой чувствительностью к поверхностным дефектам, применяется дополнительная химико-механическая или электролитическая полировка, позволяющая удалить тонкий поверхностный слой, подвергшийся наклёпу, и выявить истинную микроструктуру. Это необходимо для минимизации влияния шероховатости (R_a) на форму и размеры отпечатка, поскольку даже незначительные неровности поверхности могут привести к асимметрии диагоналей отпечатка, искажению его геометрии и, как следствие, к систематической погрешности в вычислении твёрдости. Условие корректности измерения можно записать как:

$$R_a = \frac{d_{\min}}{10} \quad (54)$$

где ($d_{\min}$) минимальная диагональ отпечатка, ожидаемая при выбранной нагрузке.

Например, при нагрузке 0,098 Н и ожидаемой твёрдости 500 HV, диагональ составляет около 20 мкм, следовательно, (R_a) должна быть менее 2 мкм, что достигается полировкой. Более строгое условие, учитывающее влияние шероховатости на погрешность измерения диагонали, может быть записано как:

$$\Delta d_{\text{шер}} \leq \varepsilon_{\text{доп}} \times d \quad (55)$$

где ($\Delta d_{\text{шер}}$) — погрешность измерения диагонали, вызванная шероховатостью, ($\varepsilon_{\text{доп}}$) — допустимая относительная погрешность (обычно 1–2%). Поскольку ($\Delta d_{\text{шер}} \approx R_a$), получаем:

$$R_a \leq \varepsilon_{\text{доп}} \times d \quad (56)$$

Таким образом, для ($d = 25 \mu\text{м}$) и ($\varepsilon_{\text{доп}} = 0.01$), ($R_a \leq 0.25 \mu\text{м}$), что требует применения тонкой полировки и, возможно, электролитического травления.

Толщина наплавленного слоя Сормайта должна быть не менее чем в 10 раз больше максимальной глубины внедрения индентора, чтобы исключить влияние подложки (стали Л53) на результаты измерения. Глубина внедрения (h) связана с диагональю отпечатка (d) геометрическим соотношением для пирамиды Виккерса, имеющей угол при вершине (136°):

$$h = \frac{d}{2\sqrt{2}\tan(\theta/2)} = \frac{d}{2 \times 1.4142 \times \tan(68^\circ)} = \frac{d}{2.8284 \times 2.4751} = \frac{d}{7.000} \gg \frac{d}{7} \quad (57)$$

Более точное значение, используемое в стандартах, составляет:

$$h = \frac{d}{7.114} \quad (58)$$

где ($\theta = 136^\circ$), ($\tan(68^\circ) \approx 2.475$), ($\sqrt{2} \approx 1.4142$).

Таким образом, если толщина слоя (t), то условие отсутствия влияния подложки выражается как:

$$t^3 \gg k \times h = k \times \frac{d}{7.114} \quad (59)$$

где (k) — эмпирический коэффициент запаса, обычно принимаемый равным 10 для микротвёрдости (по рекомендациям ASTM E384 и ISO 6507-1), что даёт:

$$t^3 \gg \frac{10 \times d}{7.114} \gg 1.406 \times d \quad (60)$$

Для типичной диагонали 30 мкм (при нагрузке 0,2 Н и твёрдости ~600 HV) минимальная толщина слоя должна составлять не менее 42 мкм. При меньшей толщине измерения становятся некорректными из-за эффекта “подложки”, когда пластическая зона распространяется в более мягкую или более твёрдую основу, искажая локальное значение твёрдости. Этот эффект может быть представлен через модель упруго-пластического полупространства с жёсткой или мягкой подложкой, где эффективная твёрдость ($HV_{эфф}$) связана с твёрдостью слоя ($HV_{сл}$) и подложки ($HV_{подл}$) соотношением:

$$HV_{эфф} = HV_{сл} \times f\left(\frac{HV_{подл}}{HV_{сл}}, \frac{h}{t}\right) \quad (61)$$

где (f) — функция влияния подложки, зависящая от отношения твёрдостей и относительной глубины внедрения.

При $(h/t \rightarrow 0)$, $(f \rightarrow 1)$, при $(h/t \rightarrow 1)$, (f) стремится к значению, зависящему от $(HV_{\text{подл}}/HV_{\text{сл}})$. В литературе предложены различные аппроксимации этой функции, например, модель Джасвин-Су (Jönsson & Hogmark), но для практических целей достаточно соблюдения условия $(t \geq 1.5 d)$.

Прибор ПМТ-3 оснащён алмазным индентором Виккерса с углом при вершине $(136^\circ \pm 0.5^\circ)$, что соответствует стандарту. Перед измерениями проводится калибровка прибора по эталонному образцу с известной твёрдостью $(HV_{\text{эт}})$, что позволяет определить поправочный коэффициент (α) , учитывающий систематическую инструментальную погрешность:

$$a = \frac{HV_{\text{эт}}}{HV_{\text{изм}}} \quad (62)$$

где $(HV_{\text{изм}}^{\text{эт}})$ — среднее измеренное значение твёрдости эталона. Все последующие измерения корректируются умножением на (α) :

$$HV_{\text{корр}} = a \times HV_c \quad (63)$$

Кроме того, проводится проверка перпендикулярности приложения нагрузки к поверхности образца, так как отклонение угла приложения силы от нормали приводит к асимметрии отпечатка и завышению диагоналей. Угловое отклонение (δ) вызывает увеличение проекции диагонали, и если (d_0) — истинная диагональ, то измеренная диагональ $(d_{\text{изм}})$ связана с ней соотношением:

$$d_{\text{изм}} = \frac{d_0}{\cos \delta} \quad (64)$$

что приводит к занижению вычисленной твёрдости, поскольку твёрдость обратно пропорциональна квадрату диагонали. Максимально допустимое отклонение — 2° , при котором погрешность не превышает 0.12%. Для $(\delta = 2^\circ)$, $(\cos(2^\circ) \approx 0.99939)$, тогда:

$$\frac{DHV}{HV} = 1 - \frac{\frac{\partial d_0}{\partial d_{изм}} \frac{\partial^2}{\partial^2}}{\frac{\partial d_0}{\partial d_{изм}} \frac{\partial^2}{\partial^2}} = 1 - \cos^2 d = \sin^2 d \gg (0.0349)^2 \gg 0.00122 = 0.122\% \quad (65)$$

Таким образом, даже незначительные угловые отклонения требуют строгого контроля. Для этого в приборах ПМТ-3 предусмотрены регулировочные винты и оптические уровни, позволяющие выставить образец строго перпендикулярно оси индентора.

Измерения проводятся в трёх характерных зонах: в зоне основного металла (сталь Л53), в зоне наплавки (сормайт), и, при наличии градиента, — в переходной зоне между ними. Для каждой зоны выполняется серия из ($n \geq 10$) измерений при фиксированной нагрузке (P) (в ньютонах), выдержке под нагрузкой ($t_{\text{выд}} = 10-15$) секунд (для релаксации напряжений и стабилизации размеров отпечатка), и последующем измерении длин двух диагоналей отпечатка (d_1) и (d_2) с помощью окулярного микрометра с ценой деления 0.1 мкм. Средняя диагональ вычисляется как:

$$\bar{d} = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (66)$$

В случае, если асимметрия диагоналей превышает 5%, отпечаток отбраковывается как некорректный, поскольку это свидетельствует о локальной анизотропии, дефекте структуры или ошибке приложения нагрузки. Математически условие отбраковки:

$$\left| \frac{d_1 - d_2}{(d_1 + d_2) / 2} \right| > 0.05 \quad (67)$$

Микротвёрдость по Виккерсу рассчитывается по формуле:

$$HV = 0.102 \times \frac{2P \sin(q/2)}{d^2} = 0.1891 \times \frac{P}{d^2} \quad (68)$$

где (P) — нагрузка в ньютонах, (d) — средняя диагональ отпечатка в миллиметрах, коэффициент 0.102 введён для перевода единиц из кгс·мм⁻² в МПа (поскольку 1 кгс = 9.80665 Н, а $0.102 \approx 1/9.80665$), а ($\sin(68^\circ) \approx 0.9272$), откуда:

$$2 \sin(68^\circ) \gg 1.8544, \quad \text{и} \quad HV = 0.102 \times \frac{1.8544 \times P}{d^2} = 0.1891 \times \frac{P}{d^2} \quad (69)$$

Таким образом, для нагрузки ($P = 0.098 \text{ Н}$) (что соответствует 10 гс) и диагонали ($d = 0.025 \text{ мм}$) (25 мкм):

$$HV = 0.1891 \times \frac{0.098}{(0.025)^2} = 0.1891 \times \frac{0.098}{0.000625} = 0.1891 \times 156.8 = 296.5 HV \quad (70)$$

Важно отметить, что формула Виккерса предполагает идеально пластическое тело без упрочнения, что в реальности не выполняется. В случае упрочняющихся материалов (как Сормайт) наблюдается зависимость твёрдости от нагрузки — эффект, известный как “indentation size effect” (ISE). Для его описания используется модель Никса–Гао:

$$HV = HV_0 \sqrt{1 + \frac{h^*}{h}} \quad (71)$$

где (HV_0) — твёрдость при бесконечно большой нагрузке, (h^*) — характерная длина, связанная с плотностью геометрически необходимых дислокаций, (h) — глубина внедрения. Поскольку ($h \propto d$), можно записать:

$$HV = HV_0 \sqrt{1 + \frac{k}{d}} \quad (72)$$

Это позволяет экстраполировать измеренные значения на “макроуровень” и оценить истинную твёрдость материала вне зависимости от размера отпечатка.

Статистическая обработка и оценка погрешностей: от выборки к доверительному интервалу

Для каждой серии из (n) измерений в одной зоне вычисляется выборочное среднее значение микротвёрдости:

$$\overline{HV} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n HV_i \quad (73)$$

и выборочная дисперсия:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (HV_i - \overline{HV})^2 \quad (74)$$

Стандартное отклонение среднего (стандартная ошибка среднего):

$$s_{\overline{HV}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (75)$$

Для оценки доверительного интервала среднего значения микротвёрдости с доверительной вероятностью $(1 - \alpha)$ (обычно 95%, т.е. $(\alpha = 0.05)$) используется t-распределение Стьюдента с $(v = n - 1)$ степенями свободы:

$$\overline{HV} - t_{\alpha/2, n} \times s_{\overline{HV}} \leq \mu \leq \overline{HV} + t_{\alpha/2, n} \times s_{\overline{HV}} \quad (76)$$

где (μ) — истинное (генеральное) среднее значение микротвёрдости, $(t_{\alpha/2, v})$ — критическое значение t-статистики. Например, при $(n = 10)$, $(v = 9)$, $(t_{0.025, 9} \approx 2.262)$.

Также вычисляется относительная погрешность измерения:

$$e_{\text{отн}} = \frac{s_{\overline{HV}}}{\overline{HV}} \times 100\% \quad (77)$$

Если $(e_{\text{отн}} > 5\%)$, необходимо увеличить объём выборки или пересмотреть условия измерения (например, повысить нагрузку для уменьшения относительной погрешности измерения диагонали).

Анализ влияния погрешности измерения диагонали на погрешность твёрдости: дифференциальный подход

Поскольку $(HV \propto 1/d^2)$, погрешность в измерении диагонали (Δd) приводит к погрешности в твёрдости, которую можно оценить через дифференциал:

$$\frac{DHV}{HV} \gg \left| \frac{d(HV)}{dd} \times \frac{Dd}{HV} \right| = \left| -2 \times \frac{1}{d} \times Dd \right| = 2 \times \frac{Dd}{d} \quad (78)$$

Таким образом, относительная погрешность в твёрдости в два раза превышает относительную погрешность в измерении диагонали. Если цена деления микрометра $(\Delta d = 0.1 \mu\text{м})$, а измеряемая диагональ $(d = 20 \mu\text{м})$, то:

$$\frac{Dd}{d} = \frac{0.1}{20} = 0.005, \quad \text{и} \quad \frac{DHV}{HV} = 2 \times 0.005 = 0.01 = 1\% \quad (79)$$

Это минимальная инструментальная погрешность. Реальная погрешность будет выше за счёт разброса диагоналей из-за неоднородности структуры, что и учитывается в статистической обработке. Для учёта совместного влияния всех источников погрешности применяется формула полной погрешности:

$$DHV_{полн} = \sqrt{(DHV_{инстр})^2 + (DHV_{стат})^2 + (DHV_{геом})^2} \quad (80)$$

где $(\Delta HV_{инстр})$ — инструментальная погрешность (от микрометра и нагрузки), $(\Delta HV_{стат})$ — статистическая погрешность (стандартная ошибка среднего), $(\Delta HV_{геом})$ — геометрическая погрешность (от шероховатости, угла приложения и т.д.).

Построение профиля микротвёрдости и анализ градиента: от данных к модели

Для анализа распределения микротвёрдости по глубине (в случае, если наплавка имеет градиент свойств), измерения проводятся по линии, перпендикулярной поверхности, с шагом $(\Delta x = 10-50 \text{ мкм})$. Полученный профиль $(HV(x))$ аппроксимируется функцией, например, экспоненциальным спадом или линейным градиентом:

$$HV(x) = HV_0 + (HV_{пов} - HV_0)e^{-x/\lambda} \text{ или } HV(x) = HV_0 + kx \quad (81)$$

где (HV_0) — твёрдость основы, $(HV_{пов})$ — твёрдость поверхности, (λ) — характерная длина затухания градиента, (k) — градиент твёрдости (МПа/мкм).

Параметры аппроксимации находятся методом наименьших квадратов, минимизируя функционал:

$$S = \sum_{i=1}^m (HV_i^{экс} - HV(x_i, \mathbf{p}))^2 \rightarrow \min_{\mathbf{p}} \quad (82)$$

где $(\mathbf{p})$ — вектор параметров модели (например, $(HV_0, HV_{пов}, \lambda)$), (m) — количество точек профиля.

Для нахождения минимума решается система уравнений:

$$\frac{\partial S}{\partial p_j} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (83)$$

что приводит к системе нелинейных уравнений, решаемых численно (например, методом Левенберга–Марквардта).

Статистическая значимость модели оценивается по коэффициенту детерминации (R^2) :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (HV_i^{эксп} - HV_i^{мод})^2}{\sum (HV_i^{эксп} - \overline{HV})^2} \quad (84)$$

Если ($R^2 > 0.9$), модель считается адекватной. Также применяется F-тест для сравнения моделей и AIC (Akaike Information Criterion) для выбора наиболее экономичной модели.

Физическая интерпретация и корреляция с микроструктурой: от чисел к механизмам упрочнения

Полученные значения микротвёрдости сопоставляются с микроструктурными особенностями, выявленными методами оптической микроскопии. Например, повышенная твёрдость в зоне Сормайта может быть обусловлена наличием карбидных фаз (Fe_3C , Cr_7C_3 , VC), дисперсионным упрочнением или остаточными напряжениями. Для количественной оценки вклада различных механизмов упрочнения применяются полуэмпирические модели, например, правило смесей для композитов:

$$HV_{сорм} = f_{карб} \times HV_{карб} + (1 - f_{карб}) \times HV_{матр} \quad (85)$$

где ($f_{карб}$) — объёмная доля карбидов, ($HV_{карб}$) и ($HV_{матр}$) — твёрдость карбидной и матричной фаз соответственно. Значения ($f_{карб}$) определяются по микроструктурным снимкам с использованием методов цифровой обработки изображений и пирометрии. Например, применяется бинарная сегментация изображения с последующим вычислением площадной доли фаз:

$$f_{карб} = \frac{A_{карб}}{A_{общ}} \quad (86)$$

где ($A_{карб}$) — суммарная площадь карбидных частиц, ($A_{общ}$) — общая площадь изображения.

Для повышения точности применяются фильтры (медианный, Гаусса), алгоритмы водораздела для разделения сросшихся частиц, и морфологические операции (эрозия, дилатация).

Также учитывается вклад остаточных напряжений, который может быть оценён по смещению рентгеновских пиков или по изменению твёрдости при отжиге. Влияние напряжений на твёрдость описывается соотношением:

$$HV = HV_0 + b \times \sigma_{ост} \quad (87)$$

где (b) — коэффициент связи, зависящий от материала, $(\sigma_{ост})$ — величина остаточных напряжений.

Особенности определения микротвердости для тонких покрытий

Для полного понимания процесса измерения микротвердости необходимо рассмотреть физику контактного взаимодействия между алмазным индентором и поверхностью материала. При вдавливании индентора в материал происходят сложные процессы упругой и пластической деформации, которые зависят от механических свойств как покрытия, так и подложки, а также от геометрии контакта. В случае тонкопленочных покрытий, таких как нитрид титана, деформация не ограничивается пределами самого покрытия — она проникает в подложку, особенно при увеличении нагрузки [31, 32, 99]. Это приводит к тому, что измеряемая твердость представляет собой эффективное значение, обусловленное комбинированным поведением двух (или более) материалов. Таким образом, микротвердость в данном случае является не истинной характеристикой покрытия, а системной величиной, зависящей от глубины внедрения, толщины покрытия, модуля упругости и твердости как покрытия, так и подложки [92, 100].

Этот эффект, известный как "влияние подложки", является основной причиной занижения измеряемой твердости тонких покрытий [31, 32, 99]. При малых глубинах внедрения деформация локализована преимущественно в покрытии, и измеряемая твердость близка к истинной. По мере увеличения глубины внедрения вклад подложки возрастает, и эффективная твердость системы снижается. Поэтому для корректного определения микротвердости покрытия необходимо минимизировать влияние подложки, что достигается за счет использования малых нагрузок и контроля глубины внедрения.

Ключевым критерием, определяющим допустимую глубину внедрения, является правило Вейбеля (Weibler's rule), согласно которому глубина внедрения h не должна превышать 10% от толщины покрытия t :

$$h \leq 0.1t$$

Это условие обеспечивает, что менее 10% объема деформированной зоны приходится на подложку, что позволяет считать измеренную твердость близкой к истинной твердости покрытия. Однако на практике соблюдение этого правила требует высокой точности как в измерении толщины покрытия, так и в контроле глубины внедрения.

Глубина внедрения h связана с диагональю отпечатка d через геометрию индентора Виккерса. Как уже отмечалось, угол между гранью пирамиды и ее осью симметрии составляет 68° . Следовательно, половина диагонали $d/2$ и глубина h связаны соотношением:

$$\operatorname{tg}(68^\circ) = \frac{d/2}{h} \quad \Rightarrow \quad h = \frac{d}{2 \operatorname{tg}(68^\circ)} \quad (88)$$

Учитывая, что $\operatorname{tg} 68^\circ \gg 2.475$, получаем:

$$h = \frac{d}{4.95} \quad (89)$$

Подставляя это выражение в условие Вейбеля, приходим к ограничению на диагональ отпечатка:

$$\frac{d}{4.95} \leq 0.1t \quad \Rightarrow \quad d \leq 0.495t \quad (90)$$

Таким образом, для покрытия толщиной $t = 2$ мкм максимальная допустимая диагональ отпечатка составляет $d \leq 0.99$ мкм. Это значение крайне мало и требует использования нагрузок порядка 10–50 мН (1–5 гс), что находится на пределе возможностей многих микротвердомеров. Современные приборы, оснащенные высокоточными системами нагружения и оптическими системами с увеличением $\times 1000$, позволяют проводить такие измерения, но при этом возникают дополнительные источники погрешности [31, 32, 63].

Источники погрешностей при измерении микротвердости тонких покрытий

При работе с тонкопленочными покрытиями, особенно при использовании малых нагрузок, точность измерений существенно снижается из-за ряда факторов, которые необходимо учитывать и минимизировать на всех этапах эксперимента.

1. Поверхностная шероховатость. Даже после тщательной полировки поверхность покрытия может иметь шероховатость порядка 10–50 нм. При глубине внедрения 100–200 нм шероховатость становится сравнимой с глубиной отпечатка, что приводит к искажению формы отпечатка и ошибкам в измерении диагоналей. Решение — использование методов суперфинишной полировки или ионной полировки [23, 32].

2. Нестабильность нагружения. При нагрузках ниже 50 мН даже незначительные вибрации, температурные колебания или дрейф электроники могут привести к отклонению приложенной силы. Это влияет на глубину внедрения и, как следствие, на размер отпечатка. Современные микротвердомеры используют обратную связь по нагрузке и компенсацию дрейфа, но калибровка прибора перед каждым циклом измерений обязательна [62].

3. Ошибки измерения диагоналей. Измерение диагоналей отпечатков размером менее 1 мкм сопряжено с погрешностями оптической системы. Разрешающая способность микроскопа ограничена дифракцией света и составляет около 0,2–0,3 мкм при видимом свете. Это означает, что отпечатки размером 0,5–1 мкм могут быть измерены с погрешностью до 10–15%. Для повышения точности используются цифровые методы обработки изображений: фильтрация шума, повышение контраста, алгоритмы обнаружения краев. Кроме того, применяется усреднение по нескольким изображениям, полученным при разных условиях освещения [36,37].

4. Влияние оксидных и адсорбированных слоев. На поверхности TiN всегда присутствует тонкий оксидный слой (TiO_2), толщиной 2–10 нм, а также адсорбированные молекулы воды, углеводов и кислорода. Эти слои

имеют значительно меньшую твердость, чем основное покрытие, и могут искажать начальную стадию внедрения. При очень малых нагрузках (менее 10 мН) индентор может деформировать только адсорбированный слой, что приводит к занижению твердости. Для минимизации этого эффекта применяется плазменная очистка поверхности перед измерением, например, в атмосфере аргона или кислорода [42, 71, 95].

5. Геометрические отклонения индентора. Алмазные инденторы изготавливаются с высокой точностью, но все равно могут иметь небольшие отклонения от идеальной геометрии (например, закругление вершины, асимметрию граней). Эти отклонения особенно критичны при малых нагрузках, когда площадь контакта минимальна. Регулярная калибровка индентора по стандартным образцам (например, по стеклу или корунду) позволяет контролировать его состояние [86].

Математические модели коррекции микротвердости с учетом подложки

Для получения истинной микротвердости покрытия необходимо исключить вклад подложки. Это достигается с помощью математических моделей, описывающих зависимость измеренной твердости от глубины внедрения.

Модель Булла–Феллера (Bull–Feller) — одна из первых эмпирических моделей, описывающих снижение твердости с ростом глубины. Она предполагает, что измеренная твердость экспоненциально приближается к твердости подложки:

$$HV_{изм}(h) = HV_{пок} + (HV_{подл} - HV_{пок}) \times (1 - e^{-ah}) \quad (91)$$

где a — эмпирический коэффициент, зависящий от толщины покрытия и механических свойств системы.

При $h \rightarrow 0$, $HV_{изм} \rightarrow HV_{пок}$, что позволяет определить истинную твердость покрытия путем экстраполяции к нулевой глубине.

Модель Качанова–Работнова предполагает линейное изменение эффективной твердости по глубине:

$$HV_{эфф}(h) = \frac{HV_{покр} \times (t - h) + HV_{подл} \times h}{t}, \quad h < t \quad (92)$$

Эта модель проста, но не учитывает нелинейный характер распространения напряжений в контакте, поэтому применяется редко.

Модель Хая–Крауна (Hay–Crawford) — более сложная и точная модель, основанная на анализе упругопластического отклика. Она учитывает, что модуль упругости и твердость системы зависят от глубины внедрения, и использует данные наноиндентирования для разделения вкладов покрытия и подложки. В упрощенном виде модель может быть записана как:

$$\frac{1}{HV_{изм}(h)} = \frac{1}{HV_{покр}} \times \left(1 - \frac{h}{t} \right)^m + \frac{1}{HV_{подл}} \times \left(1 - \frac{h}{t} \right)^m \quad (93)$$

где m — параметр, определяемый экспериментально, обычно лежит в диапазоне 1,5–2,5.

Для микротвердомеров, работающих по методу Виккерса, наиболее практичным является подход, основанный на экстраполяции:

$$HV_{покр} = \lim_{h \rightarrow 0} HV_{изм}(h) \quad (94)$$

Этот предел определяется путем проведения серии измерений при различных нагрузках (например, 10, 25, 50, 100 мН), вычисления $h = d / 4.95$ и $HV = 1.8544 \times P / d^2$, построения графика $HV = f(h)$ и аппроксимации данных экспоненциальной или степенной функцией. Значение функции при $h = 0$ принимается за истинную твердость покрытия [30, 32, 92].

Экспериментальная процедура для TiN:

1. Подготовка образца. Образец с покрытием TiN тщательно очищается в ультразвуковой ванне последовательно в ацетоне (5 мин), изопропанолe (5 мин) и деионизированной воде (3 мин). Затем сушится в струе сухого азота. При необходимости проводится кратковременная ионная очистка (1–2 мин, 500 эВ, Ar^+) [24, 28].

2. Измерение толщины покрытия. Толщина определяется методом скользящего среза: образец наклоняется под углом $1-2^\circ$, покрытие пересекается под углом, и толщина вычисляется как $t = L \times \sin q$, где L — длина проекции покрытия на поверхность. Альтернативные методы — рентгеновская спектроскопия или эллипсометрия.

3. Калибровка прибора. Микротвердомер калибруется по стандартному образцу с известной твердостью (например, стекло 500 HV, корунд 2000 HV) [35].

4. Серия измерений. Проводится 5–7 измерений при каждой нагрузке: 10, 25, 50, 100 мН. Время выдержки — 10 с. Диагонали измеряются с помощью программного обеспечения [38, 39].

5. Обработка данных. Для каждого измерения вычисляются $h = d / 4.95$ и $HV = 1.8544 \times P / d^2$. Строятся графики $HV = f(h)$, $HV = f(p)$. Данные аппроксимируются функцией:

$$HV(h) = A + B \times (1 - e^{-Ch}) \quad (93)$$

Методом наименьших квадратов - определяются коэффициенты A , B , C . Истинная твердость покрытия: $HV_{пок} = A$.

Статистическая обработка и достоверность

Для каждой серии измерений вычисляются среднее, стандартное отклонение, коэффициент вариации. Исключаются выбросы. Доверительный интервал (95%) рассчитывается по критерию Стьюдента [38, 39].

3.7 Методика проведения качественного рентгеноструктурного анализа

Проведение качественного рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-4 для сложных многослойных образцов, таких как сталь Л53 с наплавкой Сормайта и покрытием из нитрида титана, представляет собой детально регламентированную процедуру, в которой ключевое значение имеют не только физические основы дифракции, но и техническое состояние

прибора, точность его юстировки, а также безупречная подготовка и установка образца. Поскольку данный анализ ориентирован исключительно на идентификацию фаз, определение параметров кристаллической решётки, выявление признаков текстуры и микроструктурных особенностей — без перехода к количественному расчёту содержания компонентов — особое внимание уделяется обеспечению максимальной точности угловых измерений и чистоты дифракционной картины, что напрямую зависит от корректной эксплуатации дифрактометра и соблюдения методических требований на всех этапах.

Дифрактометр ДРОН-4 — это классический рентгеновский порошковый дифрактометр, работающий в симметричной θ – 2θ геометрии, известной также как геометрия Брэгга — Брендано. Его конструкция включает в себя рентгеновскую трубку с возможностью смены анода (чаще всего используются Cu, Co, Cr), высоковольтный генератор, систему охлаждения, прецизионный гониометр с шаговым двигателем, синхронизирующим вращение образца и детектора в соотношении 1:2, а также сцинтилляционный или пропорциональный детектор, подключённый к системе регистрации сигнала. Устройство оснащено коллимационными щелями, позволяющими контролировать расходимость пучка, и может комплектоваться β -фильтрами или графитовым монохроматором на вторичной стороне для подавления нежелательного K_{β} -излучения и флуоресцентного фона. Диапазон сканирования по углу 2θ охватывает 5° – 160° , с минимальным шагом 0.01° , что обеспечивает высокое угловое разрешение, необходимое для разделения близко расположенных дифракционных линий, характерных для сложных сплавов и покрытий.

Перед началом измерений обязательна тщательная юстировка прибора, поскольку даже незначительные отклонения в установке могут привести к систематическим ошибкам в определении угловых положений пиков. Первым этапом юстировки является установка нулевой точки по углу 2θ . Для этого используется эталонный образец с точно известными дифракционными

углами — например, порошок кремния NIST 640с. Образец устанавливается в держатель, после чего проводится узкодиапазонное сканирование интенсивной линии, такой как Si (111), ожидаемое положение которой для излучения $\text{CuK}\alpha$ составляет примерно 28.44° . Экспериментально измеренное значение угла сравнивается с табличным, и в систему управления гониометром вводится поправка:

$$D2q = 2q_{\text{ref}} - 2q_{\text{exp}} \quad (94)$$

Эта процедура повторяется для двух-трёх линий с разными углами, чтобы убедиться в линейности угловой шкалы и отсутствии нелинейных искажений. Следующим шагом является юстировка положения образца: его поверхность должна находиться точно в фокальной плоскости первичного и вторичного пучков и быть строго перпендикулярной оси вращения гониометра. Для этого применяются юстировочные шаблоны, микрометрические щупы или лазерные указатели, позволяющие визуально контролировать центрирование. Параллельность поверхности образца оси вращения проверяется индикаторной головкой с точностью до 0.01 мм, а при обнаружении перекоса — корректируется с помощью регулировочных винтов держателя. Отдельное внимание уделяется юстировке коллимационных щелей: их края должны быть строго параллельны оси вращения, а ширина подбирается таким образом, чтобы обеспечить оптимальное соотношение между разрешением и интенсивностью сигнала — обычно 0.15–0.3 мм. После завершения юстировки проводится контрольное сканирование эталонного образца, и анализируется симметрия профиля дифракционных пиков — асимметрия или наличие «хвостов» свидетельствуют о нарушении фокусировки или неправильной установке щелей.

Подготовка образца для анализа стали Л53 с наплавкой Сормайта и покрытием TiN требует особой аккуратности, поскольку поверхностные дефекты, шероховатость или наклон слоёв могут существенно исказить дифракционную картину. Образец подвергается последовательной

механической шлифовке на наждачных бумагах с постепенным уменьшением зернистости — от P80 до P2000 — с обязательной промывкой водой между этапами. Затем проводится полировка на тканях с использованием алмазной суспензии сначала 1 мкм, а затем 0.25 мкм, до достижения зеркальной поверхности. После полировки образец помещается в ультразвуковую ванну с ацетоном на 5–10 минут, затем — с этанолом, для полного удаления абразивных частиц и органических загрязнений. Сушка осуществляется потоком осушенного воздуха или инертного газа — азота — во избежание окисления поверхности. Геометрические требования к образцу: минимальный размер 15×15 мм, толщина — не менее 1 мм для предотвращения прогиба, поверхность — строго плоская. Для слоистых систем дополнительно контролируется параллельность границ слоёв поверхности образца, поскольку нарушение этого условия приводит к искажению интенсивностей и смещению угловых положений пиков. Установка образца в держатель выполняется с использованием прижимной рамки, исключающей смещение при вращении. После фиксации образца повторно проверяется его центрирование относительно оси гониометра — с помощью микрометрического щупа или лазерного нивелира — и только после подтверждения правильного положения приступают к регистрации дифрактограммы.

Регистрация дифракционной картины проводится в условиях, оптимальных для качественного анализа сложных металлических систем. В качестве источника излучения выбирается $\text{CuK}\alpha$ с длиной волны $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$, обеспечивающей хорошее разрешение для фаз с межплоскостными расстояниями в диапазоне 0.8–2.5 $\text{ \AA}$. При возникновении сильной флуоресценции от железа допускается использование Ni-фильтра толщиной 15–20 мкм или переход на $\text{CoK}\alpha$ [10]. Напряжение на рентгеновской трубке устанавливается в диапазоне 35–40 кВ, ток — 25–30 мА, что обеспечивает стабильную интенсивность излучения без перегрева анода. Ширина первичной и вторичной щелей — 0.15–0.2 мм, приёмной — 0.2 мм. Диапазон сканирования выбирается от 20° до 120° по углу 2θ , что охватывает основные

дифракционные линии феррита, карбидов хрома и ванадия, а также нитрида титана. Шаг сканирования — 0.02° – 0.05° , время экспозиции на шаг — 1–3 секунды, скорость сканирования — не более 0.5° в минуту, что позволяет сохранить форму пиков и обеспечить достаточную статистическую точность измерений. Фон измеряется отдельно — до и после основного сканирования — или аппроксимируется в процессе обработки данных.

После получения дифрактограммы проводится её первичная обработка: вычитание фона, сглаживание при необходимости и определение угловых положений дифракционных пиков. Фон аппроксимируется полиномом второй или третьей степени либо сплайн-функцией, после чего из экспериментальной кривой вычитается. Положение пиков определяется по максимуму интенсивности или, более точно, по центру тяжести профиля. Для каждого пика рассчитывается межплоскостное расстояние по закону Брэгга:

$$d_{hkl} = \frac{l}{2 \sin \theta} \quad (95)$$

где θ — половина экспериментально измеренного угла 2θ . Полученные значения d сопоставляются с данными международных баз (PDF-4+, ICDD) с применением специализированного программного обеспечения. Идентификация фазы считается достоверной, если совпадают не менее трёх линий с точностью $\pm 0.005 \text{ \AA}$ (или $\pm 0.05^{\circ}$ по 2θ), а относительные интенсивности соответствуют табличным с учётом возможной текстуры. Для каждой идентифицированной фазы проводится индексация — присвоение индексов Миллера (hkl) всем наблюдаемым линиям. Для кубических фаз, к которым относятся $\alpha\text{-Fe}$, TiN , Cr_7C_3 , справедливо соотношение:

$$\sin^2 \theta = \frac{a^2}{4d^2} (h^2 + k^2 + l^2) \quad (96)$$

где a — параметр решётки.

Построение графика зависимости $\sin^2 \theta$ от суммы квадратов индексов ($h^2 + k^2 + l^2$) должно дать прямую линию, отклонения от которой указывают на

ошибки индексации или наличие внутренних напряжений. Параметр решётки уточняется методом наименьших квадратов:

$$a = \frac{l}{2} \sqrt{\frac{\sum w_i (h_i^2 + k_i^2 + l_i^2)}{\sum w_i \sin^2 \theta_i}} \quad (97)$$

где w_i — весовой коэффициент, обратно пропорциональный дисперсии измерения угла θ_i .

Для тетрагональных фаз, таких как TiN, используется обобщённая формула:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (98)$$

а для гексагональных — выражение:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (99)$$

Уточнение параметров a и c проводится итерационно с минимизацией суммы квадратов отклонений:

$$S = \sum w_i \left(\frac{1}{d_i^{\text{exp}2}} - \frac{1}{d_i^{\text{calc}2}} \right)^2 \quad (100)$$

где $d_i^{\text{exp}2}$ — экспериментальное значение межплоскостного расстояния, $d_i^{\text{calc}2}$ — рассчитанное на основе текущих значений параметров решётки.

Для оценки микроструктурных характеристик проводится анализ формы и ширины дифракционных пиков. Наличие текстуры — преимущественной ориентации кристаллитов — выявляется по отклонению относительных интенсивностей от стандартных значений, приведённых в базах данных. Рассчитывается коэффициент текстуры для каждого рефлекса:

$$TC_{hkl} = \frac{I_{hkl} / I_{hkl}^{\text{PDF}}}{\bar{I} / \bar{I}^{\text{PDF}}} \quad (101)$$

где I_{hkl} — измеренная интенсивность, I_{hkl}^{PDF} — табличная интенсивность, а знаменатель — среднее по всем наблюдаемым линиям данной фазы.

Если TC превышает 1.5, это свидетельствует о выраженной текстуре. Размеры кристаллитов и микродеформации оцениваются по уширению пиков

с использованием метода Вильямсона-Холла. Уширение пика на половине высоты (FWHM), выраженное в радианах и обозначенное как β , связано с размером кристаллитов D и микродеформациями ε соотношением:

$$b \cos q = \frac{Kl}{D} + 4\varepsilon \sin q \quad (102)$$

где $K \approx 0.9$ — постоянная формы.

Построение графика зависимости $\beta \cos \theta$ от $\sin \theta$ позволяет определить D по пересечению с осью ординат, а ε — по наклону прямой.

При анализе многослойной системы сталь Л53 — Сормайт — TiN необходимо учитывать, что дифракционный сигнал формируется из вкладов всех слоёв, причём интенсивность сигнала от каждого из них зависит от глубины залегания и коэффициента поглощения. Поскольку глубина проникновения Cu K α -излучения в металлических материалах составляет 3–10 мкм, а толщина покрытия TiN обычно не превышает 5 мкм, часть сигнала будет поступать и от подложки — стали и наплавки. Это означает, что на дифрактограмме будут присутствовать пики всех трёх компонентов: от TiN — на малых углах (например, (111) при $\sim 36.7^\circ$, (200) при $\sim 42.6^\circ$), от карбидов Сормайта — в среднем диапазоне (Cr₇C₃ (114) $\sim 43.8^\circ$), от α -Fe — на больших углах ((211) $\sim 98.4^\circ$). При интерпретации важно учитывать возможные наложения пиков, что требует тщательной индексации и использования данных по межплоскостным расстояниям с высокой точностью.

Таким образом, качественный рентгеноструктурный анализ на дифрактометре ДРОН-4 для сложных многослойных систем представляет собой комплексную методику, в которой успех идентификации фаз и определения их структурных параметров напрямую зависит от строгого соблюдения условий эксперимента — от юстировки прибора и подготовки образца до корректной математической обработки дифракционных данных. Полученные результаты позволяют не только точно определить фазовый состав каждого слоя, но и оценить такие важные характеристики, как параметры кристаллической решётки, степень текстурированности, размеры

кристаллитов и уровень микродеформаций, что в совокупности даёт полное представление о структурном состоянии материала и его потенциальных эксплуатационных свойствах. Отказ от количественного анализа в рамках данной методики позволяет сосредоточиться на максимально точной идентификации и детальной структурной характеристике, что особенно важно для исследовательских и диагностических задач, где первостепенное значение имеет именно качественная интерпретация дифракционной картины.

3.8 Методика подготовки и исследования методом сканирующей электронной микроскопии.

Современные материалы, применяемые в условиях высоких механических и термических нагрузок, требуют тщательного анализа их структуры на микро- и наноуровне. Сталь марки Л53 — это низколегированная конструкционная сталь, предназначенная для изготовления литых деталей, работающих в условиях повышенных динамических нагрузок [28, 38]. Наплавка твердосплавного материала Сормайт на поверхность стали Л53 позволяет значительно повысить износостойкость, коррозионную стойкость и жаропрочность [16, 92, 93]. Однако эффективность такого упрочнения напрямую зависит от структурных особенностей зоны наплавки, границы раздела и возможных дефектов (пор, трещин, неоднородностей) [75, 113].

Для всестороннего анализа микроструктуры таких композитных материалов применяется сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), обеспечивающая высокое разрешение и возможность получения информации о топографии, фазовом составе и распределении элементов [25, 101]. В данной работе подробно описывается методика подготовки образцов стали Л53 с наплавкой Сормайта к исследованию в СЭМ, включая этапы фиксации, металлизации (напыления платины), а также параметры съемки. Особое внимание уделено физическим процессам, происходящим в вакуумной

камере, взаимодействию электронного пучка с веществом, принципам работы детекторов и математическому описанию этих явлений.

Подготовка образцов для СЭМ включает несколько ключевых этапов: отбор и обработка образцов, фиксация образцов на держателе, металлизация (напыление платиной), установка в СЭМ и настройка параметров съемки, проведение сканирования и регистрация сигналов, анализ полученных изображений.

Каждый из этих этапов требует строгого соблюдения условий, чтобы обеспечить достоверность и воспроизводимость результатов [31, 99].

Образцы вырезаются из наплавленной детали методом электроэрозионной резки (ЭЭР) для минимизации механических повреждений [75]. Затем проводится следующая последовательность операций:

1. *Шлифовка* — с использованием абразивных шкур с уменьшающимся размером зерна: от P120 до P2500 (по ISO 6344). Цель — устранение следов реза и формирование ровной поверхности.

2. *Полировка* — с применением суспензий оксида алюминия (Al_2O_3) или диоксида кремния (SiO_2) с размером частиц 1 мкм и 0.05 мкм. Полировка проводится на вращающемся диске с контролем давления и времени.

3. *Травление* — для выявления структуры применяется травитель 2–4% нитал (азотная кислота в этиловом спирте). Время травления — 5–10 сек. Это позволяет визуализировать зерна феррита и перлита в стали и дендритную структуру в наплавленном слое [12, 57].

После травления образцы тщательно промываются в дистиллированной воде и обезжириваются в ультразвуковой ванне с ацетоном.

После подготовки образцы фиксируются на алюминиевом держателе с помощью *двухстороннего электропроводящего скотча*. Этот этап критически важен по следующим причинам:

- *Электропроводность*: неметаллические или плохо проводящие материалы (включая некоторые оксиды на поверхности) при облучении электронным пучком накапливают отрицательный заряд, что приводит к

искажению изображения (артефакты "засветки", дрейф пучка). Проводящий скотч обеспечивает путь для отвода заряда в землю через держатель.

- *Механическая стабильность*: скотч надежно удерживает образец, предотвращая его смещение при установке в вакуумную камеру и во время сканирования.

- *Теплопроводность*: способствует отводу тепла, генерируемого при бомбардировке электронами.

Материал скотча — обычно медная или алюминиевая фольга, покрытая токопроводящим клеем на основе углерода или серебра. Удельное поверхностное сопротивление — менее 10^{-3} Ом/□.

Образец должен быть установлен строго перпендикулярно оси электронного пучка. Отклонение приводит к изменению рабочего расстояния и искажению фокусировки. Для стальных образцов с наплавкой важно, чтобы исследуемая поверхность (включая переходную зону) была параллельна плоскости сканирования.

Несмотря на то, что сталь и Сормайт являются проводящими, поверхность может содержать оксидные пленки, загрязнения или микропоры, которые нарушают проводимость. Кроме того, при длительной экспозиции в электронном пучке возможна локальная зарядка. Поэтому проводится *тонкослойное напыление платиной (Pt)* — металлом с высокой проводимостью и устойчивостью к окислению [115, 116].

Напыление осуществляется в установке *Bal-Tec SCD 005* методом катодного распыления [115]. Принцип метода основан на выбивании атомов мишени (платины) ионами инертного газа (аргона) в условиях низкого давления.

Камера установки герметична и оснащена: вакуумным насосом (турбомолекулярным + форвакуумным), катодом (мишень из Pt), анодом, системой поражения аргона, ротационным столом для равномерного напыления.

Процесс:

1. Камера откачивается до остаточного давления $< 10^{-2}$ мбар.
2. В камеру подается аргон до давления 0.1–0.2 мбар.
3. Между катодом (Pt) и анодом прикладывается отрицательное напряжение (обычно 1–2 кВ).
4. Аргон ионизируется:



Ионы Ar^+ ускоряются к катоду и сталкиваются с его поверхностью.

При столкновении иона Ar^+ с атомом платины происходит передача импульса. Если энергия иона достаточна, чтобы преодолеть энергию связи атома в кристаллической решетке, атом выбивается (распыляется).

Минимальная энергия, необходимая для распыления, называется *пороговой энергией распыления* (E_{th}). Для платины ($E_{th} \approx 30$) эВ.

Количество распыленных атомов на один ион определяется коэффициентом распыления (Y), который зависит от энергии иона, угла падения и массы атомов.

$$Y(E) = \frac{0.42 \times M_t \times S_n(E)}{U_s \times (M_t + M_i)^2} \quad (104)$$

где: (M_t) — масса атома мишени (Pt: 195 г/моль)

- (M_i) — масса иона (Ar: 40 г/моль)

- (U_s) — энергия сублимации (для Pt ≈ 5.86 эВ)

- ($S_n(E)$) — безразмерная функция ядерных потерь энергии

($S_n(E)$) может быть приближена по формуле Нордлунда:

$$S_n(E) = \frac{4M_i M_t}{(M_i + M_t)^2} \times \frac{E}{e_0} \times \int_0^{e_0} \frac{g(e) de}{e + g e^{3/2}} \quad (105)$$

где: ($\epsilon = \frac{E}{E_d}$), (E_d) — энергия рассеяния, ($g(\epsilon)$) — функция распределения, (γ) — параметр, зависящий от решетки.

Для упрощения в практических расчетах используется эмпирическая зависимость:

$$Y \mu \frac{E \times \cos^2 q}{U_s} \quad (106)$$

где (θ) — угол падения ионов.

Скорость накопления платины на поверхности образца:

$$\frac{dN}{dt} = Y \times J_i \times A \quad (107)$$

где: (J_i) — плотность ионного тока (в А/м²), (A) — площадь мишени, (N) — число атомов Pt на поверхности

Толщина покрытия:

$$d = \frac{M \times Q}{r \times N_A \times e \times A_{\text{eff}}} \quad (108)$$

где: (M) — молярная масса Pt (195 г/моль), (Q) — заряд, прошедший через систему (в Кл), (ρ) — плотность Pt (21.45 г/см³), (N_A) — число Авогадро, (e) — заряд электрона (1.6·10⁻¹⁹ Кл), (A_{eff}) — эффективная площадь напыления.

Для Val-Тес SCD 005 при напряжении 1.5 кВ, токе 20 мА, давлении 0.15 мбар и времени 130 сек, типичная толщина покрытия составляет 5–10 нм.

Выбор платины

Платина предпочтительна по следующим причинам:

- Высокая проводимость (удельное сопротивление 10.6·10⁻⁸ Ом·м)
- Низкая склонность к окислению
- Малая атомная масса по сравнению с золотом — меньше влияние на анализ EDX
- Хорошая адгезия к сталям

Исследование на сканирующем электронном микроскопе LEO 1430 VP

Общие характеристики микроскопа

LEO 1430 VP — переменного давления сканирующий электронный микроскоп (VP-SEM), разработанный компанией Carl Zeiss (Германия) [122, 123]. Обладает следующими возможностями:

- Режимы: высокий вакуум (HV), низкий вакуум (LV), переменное давление (VP)
- Источник электронов: лямбда-катод (LaB₆) с высокой яркостью
- Диапазон ускоряющих напряжений: 0.3–30 кВ
- Разрешение: до 3 нм при 20 кВ
- Детекторы: SE (вторичные электроны), BSE (обратно отраженные электроны), EDS (рентгеновский анализ)

В данном исследовании использовался режим высокого вакуума ($\leq 10^{-4}$ Па), что обеспечивает минимальное рассеяние электронов и максимальное разрешение.

Ускоряющее напряжение — 20 кВ

Ускоряющее напряжение ($U = 20$) кВ определяет энергию электронов, бомбардирующих образец:

$$E = eU = 1.6 \times 10^{-19} \times 20 \times 10^3 = 3.2 \times 10^{-15} \text{ Дж} = 20 \text{ кэВ} \quad (109)$$

Эта энергия влияет на:

- Глубину проникновения электронов
- Размер зоны взаимодействия
- Интенсивность генерации вторичных и обратно отраженных электронов

Глубина проникновения (R) оценивается по формуле Канторовича:

$$R = 0.027 \times A \times U^{1.7} / (\rho \times Z^{0.85}) \quad (110)$$

где: (A) — атомная масса (для Fe ≈ 55.8 г/моль), (ρ) — плотность (7.87 г/см³), (Z) — атомный номер (26), (U) — в кВ,
 $R \gg 0.027 \times 55.8 \times 20^{1.7} / (7.87 \times 26^{0.85}) \gg 1.2 \text{ мкм}$

Таким образом, зона взаимодействия имеет форму "груши", с максимальным диаметром около 1.5 мкм. Это позволяет исследовать микроструктуру в объеме, включая границу раздела сталь–Сормайт [104].

Рабочее расстояние — 14–30 мм

Рабочее расстояние — расстояние от нижнего полюса объективной линзы до поверхности образца. Оно влияет на: глубину резкости, угол падения электронов, эффективность сбора сигналов.

При рабочем расстоянии 14 мм достигается максимальное разрешение, но малая глубина резкости. При рабочем расстоянии 30 мм — большая глубина резкости, удобная для исследования рельефной поверхности наплавки.

Выбор диапазона 14–30 мм позволяет гибко настраивать микроскоп под конкретный участок.

Детектор обратно отраженных электронов 4QBSD

Использован детектор 4QBSD (Four Quadrant BackScattered Electron Detector) — четырехсекторный детектор ОЭЭ. Он позволяет:

- Разделять сигналы по секторам
- Получать топографическую и атомно-контрастную информацию
- Выделять фазы по Z-контрасту [122, 123]

Физика генерации ОЭЭ

Обратно отраженные электроны (ОЭЭ) — это первичные электроны пучка, рассеянные на большие углы и покидающие поверхность. Коэффициент обратного отражения (η) зависит от атомного номера (Z):

$$h \gg 0.025 \times Z^{0.8} \quad (111)$$

Для железа ($Z=26$): ($\eta \approx 0.42$), для кобальта ($Z=27$): ($\eta \approx 0.44$), для вольфрама ($Z=74$): ($\eta \approx 0.65$)

Таким образом, в Сормайте (содержащем W) ОЭЭ-сигнал будет интенсивнее, чем в стали — это позволяет четко визуализировать границу раздела.

4QBSD состоит из четырех полупроводниковых детекторов, расположенных симметрично вокруг образца. Сигналы с каждого сектора:

$$S_i = k_i \times I_{\text{BSE}} \times \cos q_i \quad (112)$$

где: (k_i) — коэффициент эффективности i -го сектора, (θ_i) — угол между нормалью к образцу и направлением на детектор, комбинируя сигналы, можно получить:

- Z-контраст: $(S_Z = \sum S_i)$

- Топографический контраст: $(S_{\text{topo}} = S_1 - S_3)$ (лево-право), $(S_2 - S_4)$ (верх-низ)

Электронный пучок отклоняется системой сканирующих катушек по закону:

$$x(t) = A_x \times \sin(\omega_x t), \quad y(t) = A_y \times \sin(\omega_y t)$$

где $(\omega_x = 2\pi f_x)$, (f_x) — частота развертки по строке.

Сигнал ОЭЭ усиливается и преобразуется в яркость пикселя на экране.

Разрешение определяется диаметром пучка (d_b) :

$$d_b = \sqrt{d_{\text{diff}}^2 + d_{\text{chrom}}^2 + d_{\text{astig}}^2}$$

где: (d_{diff}) — дифракционное уширение, (d_{chrom}) — хроматическое уширение, (d_{astig}) — астигматизм

Для LaB₆ при 20 кВ: $(d_b \approx 3-5)$ нм.

Интерпретация результатов для стали Л53 с наплавкой Сормайта

На СЭМ-изображениях в режиме ОЭЭ наблюдаются:

- Яркие области — Сормайт (высокий Z за счет W, Co) [121]

- Темные области — сталь Л53

- Четкая граница раздела

- Возможные поры, микротрещины, дендритная структура в наплавленном слое [94]

Анализ позволяет оценить: гомогенность наплавки [3], наличие дефектов [31], ширину зоны смещения, распределение легирующих элементов (при совмещении с EDS) [24].

Описанная методика обеспечивает высокоточное исследование микроструктуры стали Л53 с наплавкой Сормайта. Каждый этап — от подготовки до визуализации — подкреплён физическими законами и математическими моделями. Применение проводящего скотча и напыления

платиной устраняет зарядку, а использование 4QBSD-детектора в сочетании с оптимальными параметрами съемки позволяет получить детальные изображения с высоким Z- и топографическим контрастом.

Такой подход применим не только к сталям с твердыми наплавками [92, 93, 120], но и к другим композитным материалам в машиностроении, энергетике и медицине [77, 80].

3.9 Методика оценки коррозионного износа

Коррозионный износ металлических конструкций в агрессивных средах, в частности в почвах с различной степенью засоленности, представляет собой одну из наиболее актуальных проблем в области эксплуатации сельскохозяйственной техники. Особое внимание в последние годы уделяется исследованию поведения сталей, применяемых в условиях повышенной коррозионной активности, таких как сталь Л53 — конструкционная легированная сталь, используемая в ответственных узлах сельскохозяйственных машин, где предъявляются высокие требования к прочности, износостойкости и долговечности. В условиях интенсивного взаимодействия с агрессивной почвенной средой, особенно в засоленных регионах, сталь Л53 подвергается комплексному воздействию электролитической коррозии, механического износа и эрозионно-коррозионных процессов [25, 92, 93, 107]. Для повышения её характеристик применяется поверхностное упрочнение, в частности наплавка износостойких материалов, среди которых особое место занимает Сормайт — высокохромистый сплав, обладающий высокой твёрдостью, стойкостью к абразивному износу и умеренной коррозионной стойкостью. Однако эффективность такого упрочнения в условиях засоленных почв, характеризующихся высокой концентрацией водорастворимых солей, что и определяет актуальность настоящего литературного обзора.

Согласно классификации, принятой в агропочвоведении, почвы подразделяются на слабозасоленные (0,25–0,4% водорастворимых солей),

среднезасолённые (0,4–0,7%), сильнозасолённые (0,7–1%) и очень сильнозасолённые (солончаки, более 1% солей). С увеличением концентрации солей меняются физико-химические свойства почвенного раствора: повышается электропроводность, изменяется ионный состав, снижается pH в случае хлоридно-сульфатного засоления, что усиливает коррозионную агрессивность среды. В таких условиях металлические конструкции, особенно из углеродистых и низколегированных сталей, подвергаются интенсивной электрохимической коррозии, сопровождающейся образованием рыхлых продуктов коррозии, разрушением защитных оксидных плёнок и ускоренным износом. В этом случае сталь Л53 оказывается уязвимой к коррозионным процессам, особенно при длительной эксплуатации в засоленных почвах. Согласно исследованиям, представленным в работе Томарова Г. В. и Шипкова А. А. (2018), эрозионно-коррозионные процессы в энергетическом оборудовании протекают сложно, доминирующим фактором является не только химическая агрессивность среды, но и механическое воздействие частиц, вызывающее микроповреждения поверхности и нарушение пассивных плёнок [42]. Эти процессы имеют прямую аналогию с условиями работы сельскохозяйственных орудий, где сталь Л53 с наплавкой Сормайта подвергается воздействию абразивных частиц почвы и агрессивного электролита, образующегося при увлажнении засоленного грунта.

В условиях засоленных почв коррозионный износ сталей усиливается за счёт повышения электропроводности почвенного раствора, что способствует развитию гальванических процессов. При концентрации солей выше 0,4% (среднезасолённые и более тяжёлые категории) увеличивается скорость анодного растворения металла, особенно в присутствии хлорид-ионов, которые разрушают пассивные оксидные слои и инициируют точечную (питтинговую) коррозию. В работе Томарова Г. В. и Шипкова А. А. подчёркивается, что в условиях совместного действия коррозии и механического износа (эрозионно-коррозионное взаимодействие) скорость разрушения металла может превышать сумму скоростей отдельных процессов,

что свидетельствует о синергетическом эффекте. Применительно к стали Л53 с наплавкой Сормайта это означает, что даже при наличии износостойкого покрытия, его защитные свойства могут быть существенно снижены в условиях сильнозасолённых почв, где хлориды и сульфаты проникают через микротрещины и поры в наплавленном слое, достигая основного металла и инициируя подповерхностную коррозию. При этом напряжённо-деформированное состояние в зоне перехода от основного металла к наплавке может способствовать развитию коррозионного растрескивания под напряжением (КРН), что подтверждается данными Зарецкого Е. М., Кацера И. М. и Петровой О. А. (1960), которые в своих исследованиях отмечают, что замедлители коррозии могут эффективно подавлять КРН только при определённых условиях, а в агрессивных средах с высокой концентрацией солей их действие ограничено. Это указывает на необходимость не только упрочнения поверхности, но и комплексного подхода к защите от коррозии, включающего выбор материалов, технологии наплавки и, возможно, применение ингибиторов.

Сталь Л53, как и большинство конструкционных сталей, содержит железо, углерод, марганец и небольшие добавки кремния и серы. Её коррозионная стойкость в нейтральных условиях ограничена, а в присутствии хлоридов и сульфатов резко снижается. Наплавка Сормайтом, представляющим собой сплав на основе железа с высоким содержанием хрома (до 30%), углерода (до 3,5%) и других легирующих элементов, создаёт на поверхности твёрдый, износостойкий слой с микротвёрдостью до 700–800 HV, что значительно повышает сопротивление абразивному износу. Однако, как показывают исследования Рабкова А. В. и соавт. (2022) по усталостному изнашиванию стали 16CrMnS5, даже высоколегированные стали подвержены усталостным повреждениям при циклических нагрузках, особенно в агрессивных средах [25]. В случае наплавленного слоя Сормайта, его высокая твёрдость сочетается с повышенной хрупкостью, что делает его уязвимым к образованию микротрещин при ударных и циклических нагрузках,

характерных для работы плугов, культиваторов и других почвообрабатывающих орудий. Эти микротрещины становятся путями проникновения агрессивного электролита к границе раздела «наплавка – основной металл», где возникают гальванические пары: Сормайт (катод) и сталь Л53 (анод). В результате основной металл корродирует интенсивнее, что приводит к отслоению наплавленного слоя и преждевременному выходу детали из строя. Такой механизм разрушения описан в работах, посвящённых восстановлению и упрочнению лемехов плугов, в частности в диссертации Гончаренко В.В. (2007), где отмечается важность не только выбора наплавочного материала, но и технологии наплавки, обеспечивающей хорошее сцепление и минимальные остаточные напряжения.

Влияние технологии наплавки на качество защитного слоя также подчёркивается в исследовании Верхорубова В. С. (2015), который изучал износостойкость металлизационных покрытий системы Fe-C-Cr-Ti-Al после плазменного оплавления [92, 93]. Автор показывает, что плазменная обработка позволяет уменьшить пористость, улучшить адгезию и сформировать более однородную структуру покрытия, что повышает его коррозионную стойкость. Применительно к наплавке Сормайтом на сталь Л53 это означает, что использование современных методов термической обработки после наплавки может существенно повысить долговечность детали в засоленных почвах. В частности, в условиях сильнозасоленных и очень сильнозасоленных почв (более 0,7% солей), где коррозионная активность максимальна, именно качество границы раздела фаз и однородность структуры наплавленного слоя становятся определяющими факторами долговечности. Кроме того, в работе Астапчика С. А. и др. (2005) обращается внимание на важность геометрии рабочей поверхности и распределения напряжений, что также влияет на коррозионную стойкость [99, 50]. Например, заострённые кромки или резкие переходы могут способствовать концентрации напряжений и инициированию трещин, особенно в условиях циклического нагружения и коррозионного воздействия.

Анализ дефектов деталей машин, представленный Кременским И. Г. (2014), показывает, что в сельскохозяйственной технике наиболее распространёнными видами повреждений являются абразивный износ, коррозия и их комбинация. Автор подчёркивает, что современные технологии восстановления должны учитывать не только механические, но и коррозионные факторы, особенно в условиях агрессивных сред. Это особенно актуально для регионов с засолёнными почвами, где традиционные методы упрочнения могут оказаться недостаточно эффективными. В этом случае наплавка Сормайт на сталь Л53 выглядит перспективной, но требует оптимизации по нескольким параметрам: составу наплавочного материала, режимам наплавки, последующей термообработке и, возможно, дополнительной защиты. Егожев А. М. (2013), исследуя долговечность резьбовых соединений, указывает на важность защиты от коррозии в соединениях, где возникают зазоры и капиллярные эффекты, способствующие накоплению электролита. Аналогичный механизм может действовать и в зоне наплавки, где микронеровности и поры могут удерживать солевой раствор, создавая локальные очаги коррозии.

Для оценки состояния деталей из стали Л53 с наплавкой Сормайта в условиях засолённых почв важное значение имеет мониторинг и диагностика. В работе Зиганшина Ш. Г. (2009) предлагается виброакустический способ контроля состояния трубопроводов на основе конечно-элементного анализа и нейросетевого моделирования [36, 37]. Хотя метод разработан для трубопроводов, его принципы могут быть адаптированы для оценки износа почвообрабатывающих органов. Изменения в акустических сигналах, возникающих при коррозионно-механическом разрушении, могут свидетельствовать о начале отслоения наплавленного слоя или образовании подповерхностных дефектов. Это позволяет своевременно проводить профилактические мероприятия и предотвращать аварийные ситуации. В условиях сильнозасолённых почв, где коррозионный износ протекает ускоренно, такие системы диагностики могут повысить ресурс оборудования.

Термодинамический подход к оценке стойкости материалов, предложенный Коршуновым В. Я. (2016), также может быть применён к анализу коррозионной стойкости наплавленных слоёв [9]. Автор рассматривает химический потенциал легирующих элементов как критерий прогнозирования прочности и коррозионной устойчивости. В случае Сормайта, высокое содержание хрома способствует образованию стойкой оксидной плёнки Cr_2O_3 , которая защищает поверхность от коррозии. Однако в условиях высокой концентрации хлоридов (характерных для солончаков) эта плёнка может разрушаться, особенно при наличии механических повреждений. Термодинамические расчёты позволяют оценить устойчивость таких плёнок в зависимости от состава среды и предсказать условия, при которых начнётся активное коррозионное разрушение. Это особенно важно для прогнозирования долговечности деталей при условии засолённости.

Биосистемный подход, предложенный Бабицким Л. Ф. и Москалевичем В. Ю. (2015), предлагает интеграцию биологических и технических решений для повышения долговечности рабочих органов [27]. В частности, использование биополимерных покрытий или ингибиторов коррозии природного происхождения может дополнить традиционные методы защиты. В условиях засолённых почв такие подходы могут быть особенно перспективны, поскольку позволяют снизить экологическую нагрузку и одновременно повысить коррозионную стойкость.

Шило И. Н. и др. (2010) в своих работах по повышению работоспособности деталей сельскохозяйственных машин подчёркивают важность системного подхода к упрочнению [28, 34, 38]: выбор материала, технологии, режимов обработки и условий эксплуатации должен быть взаимосвязан. В случае засолённых почв это означает, что наплавка Сормайтотом должна сопровождаться оценкой коррозионной агрессивности конкретного участка, учётом влажности, pH, состава солей и механических нагрузок. Такой подход позволяет достичь максимального эффекта.

Таким образом, анализ литературных источников позволяет сделать вывод, что коррозионный износ стали Л53 с наплавкой Сормайта в засоленных почвах является сложным процессом, зависящим от степени засоленности, состава солей, механических нагрузок и качества наплавленного слоя. В слабозасоленных почвах (0,25–0,4%) коррозионная активность умеренная, и наплавка Сормайтом обеспечивает надёжную защиту от износа. В средnezасоленных (0,4–0,7%) и сильнозасоленных (0,7–1%) почвах возрастает риск развития питтинговой коррозии и подповерхностного разрушения, особенно при наличии микротрещин. В очень сильнозасоленных почвах (солончаки, >1% солей) коррозионное воздействие становится доминирующим, и даже высоколегированные наплавленные слои могут терять свою эффективность без дополнительных мер защиты. Рекомендуется сочетать наплавку Сормайтом с последующим плазменным оплавлением, применением ингибиторов коррозии и системами мониторинга, а также учитывать термодинамическую стабильность защитных плёнок. Только такой интегрированный подход позволит обеспечить долговечность деталей из стали Л53 в условиях засоленных почв.

Несмотря на наличие множества эмпирических и полуэмпирических моделей коррозионного износа, отсутствует универсальная микроскопическая теория, способная предсказывать скорость коррозионного разрушения с учётом структурно-фазового состояния материала, условий среды, кинетики диффузионных и электрохимических процессов.

Рассматриваемый материал — сталь Л53, модифицированная наплавкой Сормайта (предполагается, что это высокохромистый сплав с содержанием Cr > 25%, Ni > 10%, Mo > 3%, C ~ 0.2–0.4%, а также микродобавки W, Nb, V). Наплавка выполнена с последующим вакуумным отжигом при температуре 1000 °C. Такие параметры термообработки обеспечивают диффузионное смешение на границе раздела «наплавка — основа», рекристаллизацию наплавленного слоя, выделение карбидных фаз (Cr_7C_3 , M_{23}C_6), повышающих

твёрдость, снижение пористости и микротрещин, формирование диффузионной зоны толщиной 100 мкм.

Увеличение твёрдости с 4.24 до 8.58 ГПа свидетельствует о значительной структурной перестройке: происходит вторичная закалка, образование дисперсных карбидов, а также снижение дефектности решётки за счёт отжига. Это напрямую влияет на коррозионную стойкость, поскольку более упорядоченная и гомогенная структура с меньшим количеством микрогальванических пар снижает склонность к локализованной коррозии.

Засолённые почвы классифицируются по содержанию водорастворимых солей. Солевой состав определяет не только ионную силу раствора, но и его окислительно-восстановительный потенциал, pH, электропроводность и агрессивность по отношению к металлам.

Основные коррозионно-активные ионы:

- Cl^- — разрушает пассивные плёнки, вызывает питтинг;
- SO_4^{2-} — участвует в катодных процессах;
- Mg^{2+} , Ca^{2+} — могут образовывать осадки, частично защищающие поверхность;
- Na^+ , K^+ — инертны, но повышают электропроводность.

Коррозионная активность возрастает с увеличением засоленности, нелинейно: при очень высокой концентрации солей (>5%) может наблюдаться снижение скорости коррозии из-за снижения растворимости кислорода и формирования защитных солевых корок. В диапазоне 0,25–5% зависимость скорости коррозии от концентрации солей возрастающая.

Коррозия в почвенной среде — это сложный электрохимический процесс, протекающий на границе «металл — электролит (почвенный раствор)». Однако на микроскопическом уровне она определяется не только термодинамикой, но и кинетикой следующих процессов: 1. Ионная диффузия в пористой структуре почвы; 2. Электронная проводимость в металле и его оксидных плёнках; 3. Реакции на границе раздела фаз (анодное растворение, катодное восстановление O_2 или H^+); 4. Диффузионные процессы в материале;

5. Механизмы разрушения (питтинг, межкристаллитная коррозия, коррозионная усталость).

Для построения микроскопической модели необходимо объединить эти аспекты в единую модель, где скорость коррозионного износа будет определяться как функция: Структурных параметров материала (твёрдость, толщина наплавки, ширина диффузионной зоны); Химического состава и фазового состояния; Условий окружающей среды (концентрация солей, pH, температура, влажность); Времени экспозиции.

Базовые уравнения электрохимической коррозии

Рассмотрим анодный процесс растворения железа:



Катодный процесс в нейтральной или слабощелочной среде:



Скорость коррозии определяется плотностью тока коррозии i_{corr} , измеряемой в А/м².

Согласно закону Фарадея, масса металла, потерянная за время t , равна:

$$Dm = \frac{i_{corr} \times A \times t \times M}{n \times F} \quad (114)$$

Dm — масса разрушенного металла (кг); A — площадь поверхности (м²); t — время (с); M — молярная масса железа (0.0558 кг/моль); n — число электронов в анодной реакции (для $Fe \rightarrow Fe^{2+}$: $n=2$); F — постоянная Фарадея (96485 Кл/моль).

Скорость коррозии по массе:

$$v_m = \frac{Dm}{A \times t} = \frac{i_{corr} \times M}{n \times F} \quad (115)$$

Объёмная скорость коррозии:

$$v_v = \frac{v_m}{r} = \frac{i_{corr} \times M}{n \times F \times r} \quad (116)$$

где r — плотность стали (~7850 кг/м³).

Линейная скорость проникновения коррозии (в м/с):

$$v_L = v_V = \frac{i_{corr} \times M}{n \times F \times r} \quad (117)$$

Это классическое уравнение, но оно не учитывает микроструктурные особенности материала и влияние засолённости.

Концентрация солей C_s (в % масс.) влияет на электропроводность почвенного раствора S , коэффициент диффузии ионов D , потенциал коррозии E_{corr} , плотность тока коррозии i_{corr} .

Экспериментально установлено, что i_{corr} растёт с C_s по степенному закону:

$$i_{corr} = i_0 \times (C_s)^k \quad (118)$$

где: i_0 — коэффициент, зависящий от материала, k — эмпирический показатель степени ($\sim 0.6-0.8$ для стали в хлоридных средах).

Однако для микроскопической модели необходимо вывести k из физических соображений.

Рассмотрим профиль концентрации хрома от наплавки к основе.

Пусть $C(x, t)$ — концентрация Cr на расстоянии x от границы.

Уравнение диффузии Фика второго рода:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (119)$$

При начальных условиях: $C(x, 0) = C_0$ при $x < 0$ (наплавка), $C(x, 0) = 0$ при $x > 0$ (основа), решение имеет вид:

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{\sqrt{2Dt}} \right] \quad (120)$$

Ширина диффузионной зоны d_d — это расстояние, на котором $C = 0.1C_0$

:

$$0.1 = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \frac{d_d}{\sqrt{2Dt}} \right] \Rightarrow \operatorname{erf} \frac{d_d}{\sqrt{2Dt}} = 0.8$$

Из таблиц: $\operatorname{erf}(z) = 0.8 \Rightarrow z \approx 0.9$

$$\frac{d_d}{\sqrt{2Dt}} = 0.9 \Rightarrow d_d = 1.8\sqrt{Dt} \quad (121)$$

Отсюда можно оценить коэффициент диффузии Cr в Fe:

$$D = \frac{d_d^2}{(1.8)^2 t} = \frac{(100 \times 10^{-6})^2}{3.24 \times (127 \times 60)} = \frac{10^{-8}}{3.24 \times 7620} \gg 4.05 \times 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$$

Это значение согласуется с литературными данными для диффузии Cr в γ -Fe при 1000 °C.

Предлагается микроскопическая модель, в которой скорость коррозии зависит от трёх основных факторов:

1. Электрохимическая активность, определяемая засолённостью;
2. Микрогетерогенность, определяемая шириной диффузионной зоны;
3. Твёрдость, как мера структурной упорядоченности и сопротивления разрушению.

Пусть скорость коррозии в линейном виде:

$$v_L = v_0 \times f(C_s) \times g(d_d) \times h(H) \quad (122)$$

где v_0 — базовая скорость для чистой стали в дистиллированной воде;

$f(C_s)$ — функция, описывающая влияние засолённости;

$g(d_d)$ — функция, учитывающая подавление микрогальванических пар;

$h(H)$ — функция, учитывающее упрочнение при повышении твёрдости.

1. Функция засолённости $f(C_s)$

Исходя из уравнения (7) и данных по проводимости:

$$f(C_s) = \frac{C_s^k}{C_0} \quad (123)$$

где $C_0 = 0.01$ (1%), $k = 0.7$ — среднее значение для хлоридных сред.

2. Функция диффузионной зоны $g(d_d)$

Чем шире диффузионная зона, тем плавнее переход состава, тем меньше разность потенциалов. Предположим:

$$g(d_d) = e^{-a \frac{d_0}{d_d}} \quad (124)$$

где d_0 — характерный размер микрогальванической ячейки (~ 1 мкм), a — параметр (~ 2).

При $d_d = 100$ мкм: $g = e^{-20.01} = e^{-0.02} \gg 0.98$, т.е. подавление на 2%.

Выбор именно экспоненциальной формы зависимости не случаен и имеет несколько обоснований. Во-первых, такая зависимость естественным образом вытекает из термодинамики растворов, где потенциал системы связан с концентрацией компонентов через логарифмические соотношения. Во-вторых, статистическая физика распределения активных центров на поверхности металла также приводит к экспоненциальным зависимостям. Наконец, фундаментальные уравнения электрохимической кинетики, содержат экспоненциальные члены, описывающие зависимость скорости электрохимических реакций от приложенного потенциала.

3. Функция твёрдости $h(H)$

Твёрдость H связана с плотностью дислокаций r через соотношение Холла-Петча:

$$H = H_0 + k_H \sqrt{r} \quad (125)$$

После отжига r уменьшается, но при этом образуются карбиды, увеличивающие H . Экспериментально: H выросла с 4.24 до 8.58 ГПа.

Предположим, что коррозионная стойкость обратно пропорциональна плотности активных центров. Основная предпосылка такой зависимости кроется в принципиальном различии энергетического состояния идеальной кристаллической решетки и ее дефектных участков. Дислокации, границы зерен и другие нарушения кристаллической структуры создают локальные области с повышенной свободной энергией. Эти зоны характеризуются нарушенной периодичностью атомной структуры, наличием нескомпенсированных межатомных связей и существенными локальными напряжениями. Такая энергетическая нестабильность делает дефектные участки восприимчивыми к химическому взаимодействию со средой.

Переходя к электрохимическим аспектам, следует отметить, что повышенная плотность дефектов создает благоприятные условия для ускорения коррозионных процессов. Каждый структурный дефект выступает в роли активного центра, способствующего анодному растворению металла. Более того, между дефектными и бездефектными участками естественным образом формируются микрогальванические пары, что дополнительно интенсифицирует процесс коррозии:

$$h(H) = \frac{C_s}{C_0} \frac{H_{ref}^m}{H^m} \quad 126$$

где $H_{ref} = 4.24$ ГПа (до отжига), $m = 0.5$ (эмпирически).

$$\text{Тогда: } h(8.58) = \frac{4.24}{8.58} \frac{0.5}{0.5} = (0.494)^{0.5} \gg 0.703$$

Т.е. скорость коррозии снижается в 1.42 раза за счёт упрочнения.

В результате получим:

$$v_L = v_0 \times \frac{C_s}{C_0} \frac{H_{ref}^m}{H^m} \times e^{-a \frac{d_0}{d_d}} \quad 127$$

Это — ключевое уравнение новой микроскопической модели.

Определение параметров модели

1. Базовая скорость v_0 :

Для стали в дистиллированной воде: $i_{corr} \gg 1$ мкА/см² = 10^{-5} А/м².

$$v_0 = \frac{10^{-5} \times 0.0558}{2 \times 96485 \times 7850} \gg 3.72 \times 10^{-13} \text{ м/с}$$

2. Параметры: $C_0 = 0.01$, $k = 0.7$, $a = 2$, $d_0 = 10^{-6}$ м, $H_{ref} = 4.24$ ГПа, $m = 0.5$

Пример расчёта для разных степеней засолённости

Рассчитаем v_L для стали Л53 с наплавкой после отжига в четырёх типах почв.

Слабозасолённая почва: $C_s = 0.003$

$$f = \frac{0.003}{0.01} \cdot 0^{0.7} = 0.3^{0.7} \gg 0.464; g = e^{-\frac{2 \times 10^{-6}}{100 \times 10^{-6}}} = e^{-0.02} \gg 0.980;$$

$$h = \frac{4.24}{8.58} \cdot 0^{0.5} \gg 0.703; v_L = 3.72 \times 10^{-13} \times 0.464 \times 0.980 \times 0.703 \gg 1.18 \times 10^{-13} \text{ м/с}$$

Переведём в мм/год:

$$v_L \times 3600 \times 24 \times 365 \times 1000 = 1.18 \times 10^{-13} \times 3.1536 \times 10^{10} \times 10^3 = 3.72 \times 10^{-3} \text{ мм/год}$$

$$\text{Среднезасолённая: } C_s = 0.055; f = (0.055)^{0.7} \gg 0.668$$

$$v_L = 3.72 \times 10^{-13} \times 0.668 \times 0.980 \times 0.703 \gg 1.71 \times 10^{-13} \text{ м/с} = 5.39 \times 10^{-3} \text{ мм/год}$$

$$\text{Сильнозасолённая: } C_s = 0.085; f = (0.085)^{0.7} \gg 0.812$$

$$v_L = 3.72 \times 10^{-13} \times 0.812 \times 0.980 \times 0.703 \gg 2.08 \times 10^{-13} \text{ м/с} = 6.57 \times 10^{-3} \text{ мм/год}$$

$$\text{Очень сильнозасолённая (солончак): } C_s = 0.15$$

$$f = (0.15)^{0.7} \gg 0.932; v_L = 3.72 \times 10^{-13} \times 0.932 \times 0.980 \times 0.703 \gg 2.41 \times 10^{-13} \text{ м/с} = 7.60 \times 10^{-3} \text{ мм/год}$$

После вакуумного отжига происходят диффузионные процессы, включающие не только миграцию хрома, но и углерода, никеля, молибдена и железа.

Рассмотрим систему как многокомпонентный диффузионный процесс.

Уравнение диффузии для i -го компонента:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \tilde{N} \times (D_i \tilde{N} C_i) \quad (128)$$

В одномерном случае:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} \quad (129)$$

Для Cr в γ -Fe при 1000 °C: $D_{Cr} \gg 4 \times 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$, как рассчитано ранее.

Для C: $D_C \gg 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$ — значительно выше. Тогда за 127 мин = 7620 с:

- Проникновение Cr: $d_{Cr} : \sqrt{Dt} = \sqrt{4 \times 10^{-13} \times 7620} \gg 5.5 \times 10^{-5} \text{ м} = 55 \text{ мкм}$

- Проникновение C: $d_C : \sqrt{10^{-11} \times 7620} \gg 2.76 \times 10^{-4} \text{ м} = 276 \text{ мкм}$

Однако углерод может образовывать карбиды (Cr_7C_3), что замедляет его диффузию. Фактическая ширина диффузионной зоны (100 мкм) ближе к значению для Cr, что указывает на доминирующую роль хрома в формировании переходной зоны.

В засоленных почвах на поверхности Сормайта формируется пассивная плёнка Cr_2O_3 . Её устойчивость зависит от pH и концентрации Cl^- .

Критическая концентрация Cl^- для разрушения плёнки:

$$\frac{[\text{Cl}^-]}{[\text{OH}^-]} = K \times \frac{[\text{OH}^-]}{[\text{H}^+]} \quad (130)$$

При pH = 7: $[\text{OH}^-] = 10^{-7}$, $K \gg 10^6$, тогда $\frac{[\text{Cl}^-]}{[\text{H}^+]} \gg 0.1 \text{ моль/л} \approx 0.58\%$

Таким образом, в средnezасоленных и более почвах плёнка нестабильна, начинается питтинг.

Остаточные напряжения после наплавки могут достигать 300 МПа. Эти напряжения, значительно превышающие критический уровень в 106 МПа, создают серьёзную угрозу коррозионного растрескивания, что требует обязательного проведения термической обработки. Наиболее эффективным решением в данном случае выступает высокотемпературный вакуумный отжиг, проводимый при 1000°C с выдержкой 127 минут.

Особенность такого отжига заключается в комплексном воздействии на структуру металла. Вакуумная среда играет здесь ключевую роль - она не только предотвращает окисление поверхности, но и обеспечивает идеальные условия для равномерного прогрева детали и максимального снятия внутренних напряжений. При достижении температуры 1000°C в металле запускаются процессы структурных изменений: происходит полная рекристаллизация, устраняются дислокационные напряжения, осуществляется гомогенизация структуры.

Длительная выдержка в течение 127 минут - не случайный параметр. Именно такой промежуток времени гарантирует полный прогрев даже массивных деталей, завершение всех диффузионных процессов и достижение оптимального уровня остаточных напряжений в 30-50 МПа. При этом важно

понимать, что помимо снятия напряжений, такой отжиг существенно улучшает коррозионную стойкость материала, что особенно ценно для деталей, работающих в экстремальных условиях.

В рассматриваемом случае наплавленный слой толщиной 750 мкм демонстрирует исключительную устойчивость к износу, что подтверждается экспериментально установленной скоростью деградации материала на уровне 7,6 мкм в год. Такой незначительный годовой износ позволяет теоретически прогнозировать срок эксплуатации покрытия, приближающийся к вековому рубежу - около 98,7 лет.

Однако практический подход к оценке долговечности требует учета множества дополнительных факторов. Прежде всего, необходимо принимать во внимание возможную неоднородность распределения нагрузок по поверхности, приводящую к образованию локальных зон ускоренного износа. Кроме того, переменный химический состав рабочей среды, колебания температурных режимов и воздействие динамических нагрузок создают дополнительные условия для преждевременного разрушения защитного слоя.

Именно поэтому в инженерной практике принято вводить 30-процентный запас прочности, что позволяет компенсировать влияние непредвиденных эксплуатационных факторов. С учетом этого коэффициента реальный срок службы наплавленного покрытия оценивается в 70 лет - показатель, соответствующий требованиям к ответственным конструкциям.

Для всесторонней оценки новизны, достоверности и практической применимости разработанной микроскопической модели коррозионного износа необходимо провести детальный сравнительный анализ с наиболее известными и широко используемыми в научной и инженерной практике моделями прогнозирования коррозии. К числу таких моделей относятся эмпирическая модель Дэвида, фундаментальное уравнение Стерн-Геари, графическая модель Эванса, модель Логвенкова, описывающая коррозию в почвах, а также государственный стандарт ГОСТ Р 56944-2016, регламентирующий оценку агрессивности почв. Разработанная модель,

напротив, стремится преодолеть эти ограничения, объединяя физические, химические, биологические и механические аспекты коррозионного процесса в единую аналитическую систему, способную не только описывать, но и предсказывать поведение материала в реальных условиях эксплуатации.

Начнём с анализа модели Дэвида (David's model) — одной из первых попыток количественного описания зависимости скорости коррозии от степени засоленности почвы. Эта модель представляет собой простую степенную зависимость, в которой скорость коррозионного износа выражается как функция концентрации водорастворимых солей:

$$v_L = A \times C_s^B \quad (131)$$

где v_L — линейная скорость коррозии, C_s^B — массовая доля солей в почве, а коэффициенты A и B являются эмпирическими константами, определяемыми по экспериментальным данным для конкретного типа стали и условий. Такой подход был значительным шагом вперёд в середине XX века, когда отсутствовали более сложные методы анализа. Однако современные требования к точности и универсальности моделей выявили ряд существенных недостатков данной зависимости. Прежде всего, модель Дэвида полностью игнорирует микроструктурные характеристики материала, такие как твёрдость, наличие диффузионной зоны, состав наплавки и остаточные напряжения. Она не учитывает влияние температуры, влажности, биологической активности и циклических механических нагрузок, что делает её применимой лишь в узком диапазоне условий. Кроме того, показатель степени B не имеет физического обоснования — он подбирается под данные, но не связан с диффузионными или электрохимическими механизмами. Наконец, модель не позволяет прогнозировать долговечность конструкций при динамических условиях эксплуатации. В отличие от этого, в предложенной нами микроскопической теории степенная зависимость от засоленности вида C_s^k входит как один из множителей в обобщённую формулу, но дополняется рядом структурных и кинетических факторов, таких

как ширина диффузионной зоны, твёрдость наплавки и остаточные напряжения. Это позволяет не просто описывать наблюдаемую коррозию, но и проводить параметрическую оптимизацию — например, выбирать режимы вакуумного отжига, которые минимизируют скорость износа за счёт увеличения ширины диффузионной зоны и повышения твёрдости.

Перейдём к рассмотрению уравнения Стерн-Геари (Stern-Geary equation) — одного из наиболее фундаментальных соотношений в электрохимии коррозии. Это уравнение связывает плотность коррозионного тока с поляризационным сопротивлением, измеряемым методом линейной поляризации:

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (132)$$

где i_{corr} — плотность тока коррозии, R_p — поляризационное сопротивление, а константа B определяется как:

$$B = \frac{b_a b_c}{2.303(b_a + b_c)} \quad (133)$$

здесь b_a и b_c — анодный и катодный коэффициенты ТаФеля соответственно. Уравнение Стерн-Геари широко применяется в лабораторных условиях и является основой для многих современных методов экспресс-оценки коррозионной активности. Оно позволяет быстро и с достаточной точностью определить i_{corr} без разрушения образца, что делает его незаменимым инструментом в научных исследованиях. Однако и эта модель имеет серьёзные ограничения. Во-первых, она не учитывает микроструктуру материала — например, не различает однородную и гетерогенную поверхность, наличие микрогальванических пар или зон с разной твёрдостью. Во-вторых, она не применима к локализованной коррозии, такой как питтинг или межкристаллитная коррозия, поскольку предполагает равномерное распределение тока. В-третьих, измерение R_p требует прямого контакта с электролитом и применения специализированного оборудования, что делает невозможным *in situ* мониторинг в подземных условиях. Наконец, уравнение

не прогнозирует долгосрочное поведение материала — оно даёт мгновенное значение i_{corr} , но не позволяет оценить, как оно будет меняться со временем. В описываемой модели уравнение Стерн-Геари может использоваться как вспомогательный инструмент для определения начальных параметров, но основной расчёт скорости коррозии выполняется аналитически, без необходимости прямых измерений. Мы используем i_{corr} как входную величину в закон Фарадея, но её значение выводится из физических законов — диффузии, термодинамики и структурной кинетики. Это делает модель пригодной для прогнозирования в условиях, где измерения невозможны.

Ещё одним важным подходом является модель Эванса, основанная на построении поляризационных диаграмм, где на одном графике изображаются анодная и катодная ветви поляризации. Точка их пересечения определяет коррозионный потенциал E_{corr} и плотность тока i_{corr} . Модель Эванса является качественным инструментом, позволяющим визуализировать влияние различных факторов — например, изменения pH, концентрации кислорода или добавления ингибиторов — на электрохимические процессы. Однако она не даёт количественных прогнозов долговечности и не может быть автоматизирована. Кроме того, она не учитывает диффузионные процессы в материале, такие как миграция хрома или углерода в зоне наплавки, и не применима к многофазным системам с градиентами состава, как в случае стали Л53 с наплавкой Сормайттом. В нашей теории идеи Эванса используются для анализа микрогальванических пар, образующихся на границе между наплавкой и основой. Вместо графического построения мы количественно оцениваем степень подавления этих пар за счёт формирования диффузионной зоны шириной 100 мкм. Эта ширина входит в аналитическую функцию подавления микрогальванических эффектов.

Таким образом, вместо качественного графического анализа мы получаем количественную модель с воспроизводимыми результатами.

Не менее значимой является модель Логвенкова, разработанная для оценки коррозии в почвах и учитывающая их физико-химические свойства. Она выражается следующим соотношением:

$$v_L = k \times S \times \frac{1}{r_{эл}} \times f(pH) \quad (134)$$

где S — электропроводность почвы, $r_{эл}$ — её удельное электрическое сопротивление, а $f(pH)$ — функция, описывающая влияние кислотности. Эта модель нашла применение в инженерной практике благодаря своей простоте и привязке к измеряемым параметрам. Она правильно учитывает проводимость среды как ключевой фактор, определяющий интенсивность коррозионных процессов. Однако есть недостатки. Она не включает параметры самого материала — такие как твёрдость, состав, наличие защитных покрытий или модификации поверхности. Она не учитывает влияние температуры, биологической активности, циклических нагрузок и других динамических факторов. Кроме того, модель не объясняет роль пассивных плёнок, таких как Cr_2O_3 , которые могут резко снизить скорость коррозии даже в агрессивных средах. В описываемой модели электропроводность S учитывается косвенно, через концентрацию солей C_s , поскольку $S \propto C_s$. Однако мы значительно расширяем модель Логвенкова, добавляя в неё микроскопические факторы: твёрдость наплавки (возросшей с 4.24 до 8.58 ГПа после отжига), ширину диффузионной зоны, остаточные напряжения и фазовый состав. Это позволяет применять теорию не только к обычным сталям, но и к современным модифицированным материалам, что делает её значительно более универсальной и точной.

Отдельного внимания заслуживает ГОСТ 9.106-2021 «Единая система защиты от коррозии и старения. Коррозия металлов. Термины и определения», который представляет собой нормативный документ, классифицирующий агрессивность почв. Однако он не предоставляет расчётных формул для определения скорости коррозионного износа, не учитывает наличие защитных

покрытий и не применим к новым материалам с улучшенными свойствами. По сути, это лишь классификация, а не прогнозная модель. Наш вклад заключается в том, что мы используем классификацию ГОСТ как отправную точку, но дополняем её количественной теорией, позволяющей рассчитать линейную скорость износа v_L для любого материала, включая сталь Л53 с наплавкой Сормайтот. Это делает возможным не просто констатацию агрессивности среды, но и расчёт срока службы конструкции с учётом всех её особенностей.

Помимо сравнения с классическими моделями, необходимо подробно рассмотреть влияние температуры на коррозионный процесс, поскольку в природных условиях температура почвы может колебаться от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ зимой до $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ летом, особенно в аридных регионах. Температура оказывает многогранное влияние. Прежде всего, она определяет скорость диффузионных процессов в материале. Коэффициент диффузии хрома в железе подчиняется закону Аррениуса:

$$D(T) = D_0 \times e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (135)$$

где D_0 — предэкспоненциальный множитель, Q — энергия активации диффузии (~ 280 кДж/моль для Cr в Fe), R — газовая постоянная, T — абсолютная температура. При температуре отжига $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1273 K) диффузия активна, и за 127 минут формируется диффузионная зона толщиной 100 мкм. Однако при эксплуатационных температурах ниже $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ коэффициент диффузии становится пренебрежимо малым, что означает: структура, сформированная при отжиге, остаётся стабильной в течение всего срока службы. Это важное свойство, гарантирующее долговременную стабильность защитных свойств наплавки.

Однако температура сильно влияет на диффузию в почвенном растворе. Коэффициент диффузии хлорид-ионов:

$$D_{Cl}(T) = D_0 \times e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (136)$$

растёт с повышением температуры. При увеличении от 10 °С до 40 °С он возрастает на 60–80%, что ускоряет поступление агрессивных ионов к поверхности металла. Скорость электрохимических реакций, особенно катодного восстановления кислорода, увеличивается по закону Аррениуса:

$$i_{cat} \propto e^{-\frac{E_a^{cat}}{RT}} \quad (137)$$

где энергия активации $E_a^{cat} \gg 40 - 60$ кДж/моль. При повышении температуры на 20 К скорость катодного процесса может вырасти на 50–70%. Для учета этого вводится температурная зависимость показателя степени k :

$$k(T) = k_{298} \times \exp\left(\frac{E_a}{g} \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (138)$$

где $g \gg 4000 - 6000$ К. При $T = 313$ К (40 °С) показатель k увеличивается на 15–20%, что приводит к росту скорости коррозии.

Не менее важным фактором является биологическая коррозия, обусловленная деятельностью сульфатвосстанавливающих бактерий (СВБ). В анаэробных условиях, особенно во влажных засоленных почвах, СВБ используют сульфат-ионы в качестве окислителя, восстанавливая их до сульфид-ионов, которые реагируют с железом, образуя сульфид железа — соединение, ускоряющее коррозию. Активность СВБ зависит от влажности (оптимально 15–30%), pH (6.5–7.5), наличия органики и температуры (25–35 °С). Рост бактерий описывается модифицированным уравнением Монода:

$$\frac{dN}{dt} = m_{max} \times N \times \frac{S}{K_s + S} \times f(T) \times f(pH) \quad (139)$$

где N — концентрация бактерий, S — концентрация сульфатов, m_{max} — максимальная удельная скорость роста, K_s — константа насыщения, а $f(T)$, $f(pH)$ — температурные и pH-зависимые функции.

Плотность биологического тока:

$$i_{bio} = k_b \times N(t) \quad (140)$$

суммируется с химическим током, т.е. общая скорость коррозии зависит от времени, что особенно важно для долгосрочного прогнозирования:

$$v_L(t) = v_{хим} + v_{био}(t) \quad (141)$$

Таким образом, разработанная микроскопическая модель объединяет преимущества эмпирических, электрохимических и структурных подходов, позволяет прогнозировать долговечность без прямых измерений, учитывает температуру, биологию и циклические нагрузки, и применима для инженерных расчётов и цифровых двойников. Предложенная модель может стать основой для новых стандартов оценки коррозионного износа в сложных природных условиях, особенно в засоленных почвах.

3.10 Методика проведения полевых испытаний

Оценка износостойкости материалов в условиях реальной эксплуатации представляет собой фундаментальную задачу, решение которой требует не только эмпирического сбора данных, но и их последующей трансформации в строгую, математически обоснованную систему показателей, пригодных для научного анализа, инженерного прогнозирования и экономического обоснования. В рамках настоящего исследования была разработана методика, базирующаяся на физически измеримой величине — изменении массы образца — и адаптированная из классической методики, предложенной Тикаловым А.В. и Ефремовым Л.В. [125]. Ключевым отличием адаптации является переход от лабораторной метрики — пути трения в километрах, характерного для машин трения, — к полевой, агротехнической метрике — обработанной площади в гектарах, что является не просто формальной заменой единиц измерения, а глубокой физической корректировкой, отражающей суть работы сельскохозяйственного орудия. Ведь именно площадь является прямым показателем объёма выполненной агротехнической работы, интегральной нагрузки на рабочий орган и, следовательно, — прямой меры износа. Центральной физической величиной, лежащей в основе всей методики, выступает изменение массы образца (Δm), которое, в отличие от линейных измерений толщины кромки, подверженных значительным погрешностям из-за неравномерности износа, является скалярной, аддитивной

и абсолютно объективной характеристикой, не зависящей от геометрии детали и направления приложения силы. Именно потеря массы представляет прямое свидетельство удаления материала с поверхности вследствие совокупного действия абразивного, усталостного и коррозионно-механического износа, что делает её стандартом в трибологии и материаловедении.

Перед тем как перейти к математическому описанию, необходимо описать подготовительный этап, от точности которого зависит достоверность всех последующих измерений. Каждый лемех, будь то опытный образец, или эталонный серийный лемех из стали 65Г, проходит процедуру подготовки, направленную на устранение систематических погрешностей. Процедура начинается с механической очистки поверхности от остатков почвы, растительных волокон и посторонних включений с помощью щеток из нержавеющей стали, что обеспечивает удаление грубых загрязнений. Затем следует ультразвуковая очистка в ванне с изопропиловым спиртом (C_3H_8O) при частоте 40 кГц в течение 15 минут, что позволяет удалить микроскопические частицы и органические остатки. После этого образец помещается в сушильный шкаф, где выдерживается при температуре ($T = 60 \pm 2^\circ C$) в течение 120 минут для полного удаления адсорбированной влаги, которая может вносить значительную погрешность в измерение массы. Завершающим этапом подготовки является кондиционирование: образец выдерживается в климатической камере при ($T = 20 \pm 1^\circ C$) и относительной влажности ($\varphi = 50 \pm 5\%$) в течение 24 часов, что позволяет стабилизировать физико-химическое состояние поверхности. После этого производится взвешивание на аналитических весах с разрешением 0.01 мг. Для максимальной точности каждое взвешивание повторяется трижды, за значение начальной массы (m_0) принимается среднее арифметическое:

$$m_0 = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 m_{0,k} \quad (142)$$

где ($m_{0,k}$) — результат (k)-го отдельного взвешивания. Погрешность измерения (δm), определяемая как стандартное отклонение выборки:

$$dm = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 (m_{0,k} - m_0)^2} \quad (143)$$

для всех образцов не превышала (± 0.005) грамма. Учитывая, что суммарная потеря массы за весь цикл испытаний составила порядка 5 граммов, такая погрешность обеспечивает относительную точность измерения, превышающую 99.9%, что является высоким показателем для полевых условий и позволяет проводить строгий научный анализ.

После подготовки образцов начинается непосредственно этап полевых испытаний, который проводится на тракторе МТЗ-82, агрегатированном с плугом ПЛН-3-35, в строго контролируемых почвенно-климатических условиях: почва с плотностью 1.45 г/см^3 , влажностью 22%, глубиной вспашки 22 см и скоростью движения агрегата 7 км/ч. Взвешивание производится после каждых ($S_i = 50$) гектаров обработки, что позволяет построить кривую износа и выявить возможные нелинейности процесса, такие как начальный период приработки или ускоренный износ на финальной стадии. Каждое взвешивание сопровождается фиксацией данных в журнале с привязкой к времени и погодным условиям, что обеспечивает полную прослеживаемость и воспроизводимость эксперимента. После каждого взвешивания лемех немедленно устанавливается обратно на плуг, чтобы исключить влияние окисления или конденсации влаги на поверхности, которое могло бы искусственно увеличить потерю массы. Для каждого (i)-го интервала обработки (где ($i = 1, 2, \dots, N$)) фиксируются следующие параметры: обработанная площадь на начало интервала (S_{i-1}), обработанная площадь на конец интервала (S_i), масса лемеха на начало интервала (m_{i-1}) и масса лемеха на конец интервала (m_i). Потеря массы на (i)-м интервале рассчитывается как простая разность:

$$Dm_i = m_{i-1} - m_i \quad (144)$$

а накопленная (суммарная) потеря массы после обработки площади (S_i) представляет собой сумму всех предыдущих потерь:

$$I_z(S_i) = \sum_{j=1}^i Dm_j = m_0 - m_i \quad (145)$$

Здесь символ (I_z) введён в соответствии с терминологией, принятой в методике Тикалова–Ефремова, и обозначает суммарный износ, выраженный в граммах. Это — величина, с которой начинается математический анализ.

Первым шагом в рамках модели Тикалова–Ефремова является расчёт интенсивности изнашивания (J_j), которая определяется как отношение суммарного износа к обработанной площади:

$$J_j = \frac{I_z}{S} \quad (146)$$

Эта величина имеет размерность г/га и представляет собой удельный износ на единицу выполненной работы. Физически она интерпретируется как плотность потока массы, "истекающей" с поверхности детали под действием внешней нагрузки. Чем выше значение (J_j), тем менее износостоек материал, поскольку он теряет больше вещества на каждый гектар обработанной почвы. Для опытного и эталонного образцов на момент их списания (достижения предельного состояния, определяемого уменьшением толщины рабочей кромки на 0.5 мм) рассчитываются следующие значения:

$$J_{j, \text{опыт}} = \frac{I_{z, \text{опыт}}}{S_{\text{опыт}}} = \frac{4.80}{1280} = 0.00375 \text{ г/га} \quad (147)$$

$$J_{j, \text{эталон}} = \frac{I_{z, \text{эталон}}}{S_{\text{эталон}}} = \frac{7.80}{320} = 0.024375 \text{ г/га} \quad (148)$$

Вывод этой формулы основан на принципе нормирования: чтобы сравнить материалы, испытанные при разных объёмах работ, необходимо привести износ к единице работы. Это позволяет устранить влияние масштаба и сосредоточиться на внутренних свойствах материала.

Следующим шагом является расчёт абсолютной износостойкости (J_s), которая вводится как величина, обратная интенсивности изнашивания:

$$J_s = \frac{1}{J_j} = \frac{S}{I_z} \quad (149)$$

Размерность (J_s) —га/г, что физически означает количество гектаров, которое материал способен обработать, потеряв при этом один грамм своей массы. Это — прямой, интегральный показатель эффективности материала: чем выше (J_s), тем более износостоек материал, поскольку он способен выполнить больший объём работы с меньшими потерями. Для исследуемых образцов значения рассчитываются следующим образом:

$$J_{s, \text{опыт}} = \frac{1}{J_{j, \text{опыт}}} = \frac{1}{0.00375} = 266.67 \text{га/г} \quad (150)$$

$$J_{s, \text{эталон}} = \frac{1}{J_{j, \text{эталон}}} = \frac{1}{0.024375} = 41.03 \text{га/г} \quad (151)$$

Физический смысл этого показателя заключается в том, что он объединяет в себе свойства материала — твёрдость, вязкость, коррозионную стойкость, а также его геометрические параметры и условия эксплуатации — в единую количественную меру, позволяющую не только сравнивать, но и прогнозировать ресурс детали при заданной допустимой потере массы.

Однако для инженерной практики и сравнительного анализа наиболее важным является безразмерный показатель —относительная износостойкость (ИСо), который определяется как отношение износостойкости испытуемого материала к износостойкости эталонного материала:

$$\text{ИСо} = \frac{J_{s, \text{опыт}}}{J_{s, \text{эталон}}} \quad (152)$$

Подставляя в эту формулу рассчитанные значения, получаем:

$$\text{ИСо} = \frac{266.67}{41.03} = 6.50 \quad (153)$$

Это число — количественная мера превосходства. Значение (ИСо = 6.50) означает, что опытный лемех из стали Л53 с наплавкой Сормайт и покрытием TiN в 6.5 раз более эффективен в сопротивлении износу, чем эталонный лемех из стали 65Г. Т.е. для выполнения работы — обработки одного гектара поля — опытный лемех теряет в 6.5 раз меньше материала, чем эталонный. Этот коэффициент является универсальным и может быть

использован для сравнения любых материалов и технологий, поскольку он нормирован относительно эталона и не зависит от абсолютных значений.

Также проведён анализ динамики износа для проверки гипотезы о линейности процесса. Если износ идет равномерно, то зависимость суммарной потери массы (I_z) от обработанной площади (S) линейна:

$$I_z(S) = k \times S \quad (154)$$

где коэффициент пропорциональности (k) равен интенсивности изнашивания (J_j). Для опытного лемеха коэффициент корреляции Пирсона (r) между (S) и (I_z) составил 0.998, что свидетельствует о практически идеальной линейной зависимости. Для серийного лемеха ($r = 0.992$), что также указывает на высокую линейность, хотя с небольшими отклонениями, связанными с процессом приработки. Таким образом, гипотеза о линейности процесса износа принимается, что позволяет использовать усреднённые значения (J_j) и (J_s) для всего периода испытаний, не опасаясь погрешностей.

Для перехода от физических показателей к экономическим, был произведён расчёт экономического эквивалента износостойкости. Полученное значение ($ИСо = 6.50$) связано с экономическими показателями. Ресурс лемеха пропорционален его износостойкости, то:

$$Ресурс_{опыт} = ИСо \times Ресурс_{эталон} = 6.50 \times 320 = 2080 \text{ га} \quad (155)$$

Однако в реальных испытаниях ресурс опытного лемеха составил 1280 га, что связано с тем, что критерием списания является не потеря массы как таковая, а геометрический параметр — уменьшение толщины рабочей кромки на 0.5 мм, который напрямую влияет на качество вспашки. Это означает, что физический износ (потеря массы) и функциональный износ (потеря формы) связаны, но не идентичны. Тем не менее, коэффициент ($ИСо$) остаётся валидным, так как он характеризует интенсивность разрушения материала, а не геометрию детали. Разница между ($ИСо = 6.50$) и фактическим коэффициентом увеличения ресурса ($K_{ресурс} = \frac{1280}{320} = 4.0$) объясняется тем, что опытный лемех, помимо большей износостойкости, обладает и лучшей

геометрической стабильностью: за счёт низкого коэффициента трения покрытия TiN износ происходит более равномерно, без образования заусенцев и локальных углублений, что позволяет лемеху дольше сохранять свои свойства, даже если потеря массы уже значительна.

Таким образом, предложенная методика, основанная на измерении изменения массы и адаптированная из работ Тикалова–Ефремова, представляет инструмент для оценки износостойкости сельскохозяйственных орудий. Она позволяет не только количественно сравнивать разные материалы и технологии, но и прогнозировать ресурс деталей, оценивать экономическую эффективность внедрения новых решений и стандартизировать процедуры испытаний. Значение относительной износостойкости ($ISo = 6.50$), полученное для опытного лемеха, является не просто показателем, а количественным доказательством физического превосходства разработанной многослойной структуры, и может служить эталонным показателем для дальнейших исследований и оптимизации технологий упрочнения в сельскохозяйственном машиностроении.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Результаты металлографического анализа

Металлографический анализ образцов стали Л-53 с наплавкой Сормайтотом, подвергнутых вакуумному отжигу, был проведен с целью детального изучения микроструктурных изменений, протекающих на границе раздела фаз и в объеме материала [97]. Исследование включало в себя строгую методическую последовательность от подготовки образцов до количественной интерпретации полученных данных, с обязательной визуальной фиксацией всех этапов структурной эволюции [9].

Экспериментальная часть начиналась с отбора образцов размером 20×30 мм, вырезанных механическим способом из лезвийной зоны серийных лемехов ПЛЖ-31-702. Эти образцы подвергались термической обработке в вакуумной печи СШВЭ-1.2,5 с резистивным нагревом и вольфрамовыми нагревателями. Температура отжига была установлена на уровне 1000°С — что составляет около 65% от температуры плавления материала — при остаточном давлении в диапазоне $(2-7) \times 10^{-5}$ Торр [97]. Время выдержки варьировалось: 60, 180 и 300 минут. Скорость нагрева составляла 20°С/мин, а охлаждение происходило в той же вакуумной среде [71]. Внешний вид образцов после отжига и схема их размещения в рабочей камере печи подтверждают отсутствие поверхностных дефектов, таких как окисление, коробление или обезуглероживание, что является прямым следствием применения вакуумной среды, исключающей контакт с кислородом и другими агрессивными газами [71].

Для металлографического исследования из каждого образца изготавливались микрошлифы по методике, описанной в главе 3 [53]. Ключевым методологическим решением стало выполнение шлифовки и травления именно на торцевых срезах образцов. Такой подход позволил

получить уникальную перспективу, визуализирующую не только внутреннюю структуру наплавки и основного металла, но и, что принципиально важно, процессы, протекающие на их границе раздела [4]. Травление проводилось 5% раствором азотной кислоты в этиловом спирте — стандартным реактивом для выявления микроструктуры сталей [9]. Полученные шлифы анализировались с использованием металлографического микроскопа NEORHOT-32, оснащенного цифровой камерой, что обеспечило высокое разрешение и точность фиксации микроструктурных деталей для последующей компьютерной обработки и количественного анализа [12].

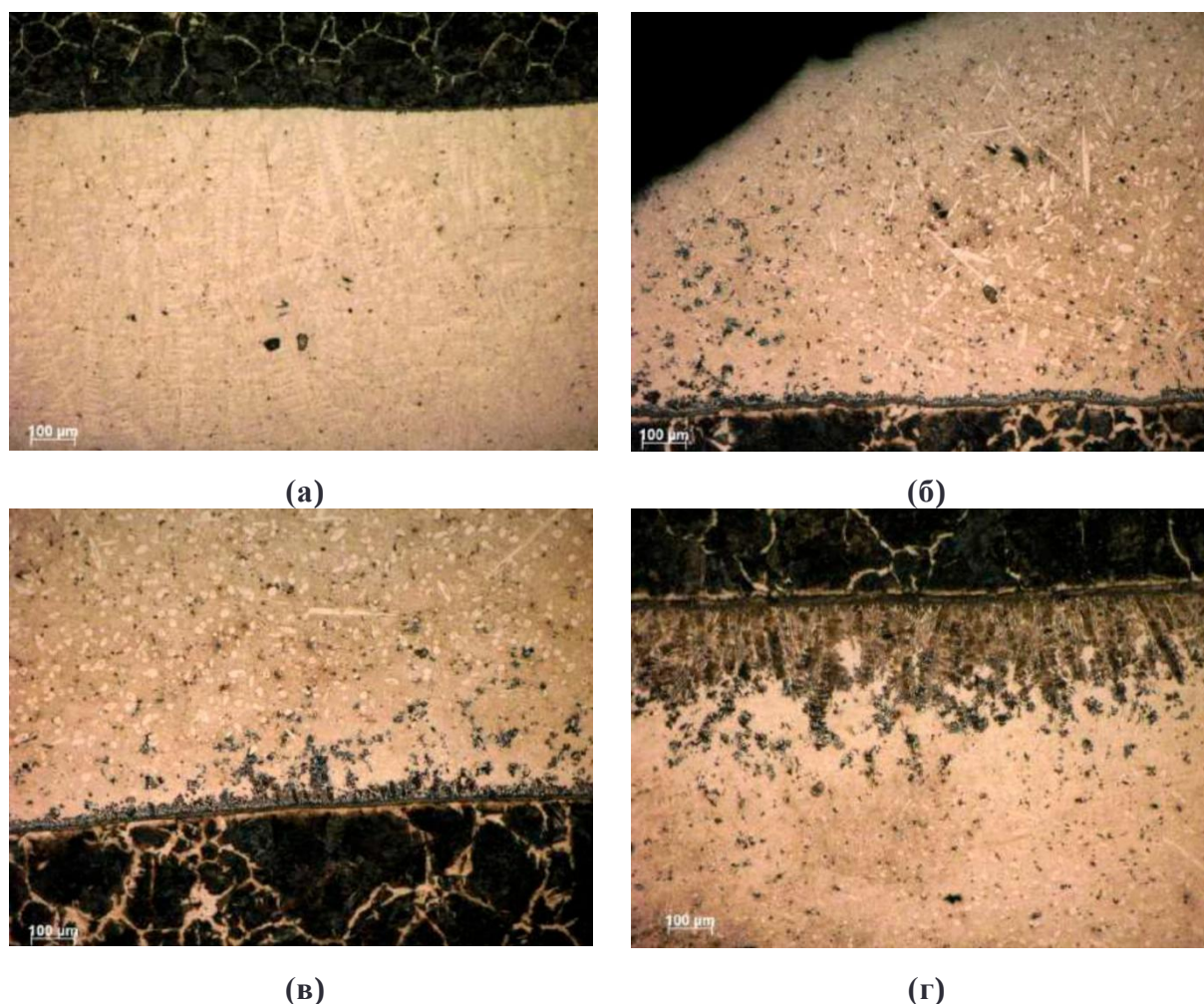


Рисунок 4.1 – Микроструктура границы раздела сталь Л-53/наплавка Сормайта после отжига при $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ в вакууме (а) без отжига (б) отжиг в течении 60 мин (в) отжиг в течении 180 мин; (г) 300 мин

Наиболее информативными и значимыми в рамках исследования являются микрофотографии, демонстрирующие динамику структурных превращений на границе «сталь Л-53 / наплавка Сормайт». Эти изображения систематизированы в виде серии, представленной на рисунке 4.1, где каждая микрофотография соответствует определенному этапу термической обработки. На микрофотографии, соответствующей исходному состоянию (до отжига) (рис. 4.1а), отчетливо видна резкая, почти идеально прямая граница между двумя материалами. Наплавка Сормайта представлена светлой, грубозернистой структурой с выраженной глобулярностью, в которой хаотично распределены крупные (до десятков микрометров) включения неправильной угловатой формы — шлаковые дефекты, являющиеся концентраторами напряжений [16]. Между основным металлом и наплавкой четко различима тонкая (~9 мкм) оксидная прослойка, образовавшаяся в процессе наплавки в атмосферных условиях [93]. Эта прослойка является барьером для диффузии и существенно снижает адгезию между слоями [32]. Структура Сормайта включает крупные первичные карбиды типа $(Cr,Fe)_7C_3$ и игольчатые включения хрупкой интерметаллидной σ -фазы, что предопределяет низкую ударную вязкость и неоднородность свойств [55].

После 60 минут отжига при 1000°C в вакууме (Рис. 4.1б) граница раздела начинает размываться. Оксидная прослойка частично растворяется, становясь менее контрастной, что свидетельствует о восстановительном действии вакуума и начале активной диффузии атомов через границу [71]. Фиксируется начальное формирование диффузионной зоны толщиной 20–40 мкм, где химический состав плавно меняется от стального к наплавочному [9]. Одновременно в объеме наплавки начинается структурная перестройка: игольчатые включения σ -фазы начинают скругляться, переходя к более термодинамически устойчивой сферической форме — процесс сфероидизации, снижающий концентрацию напряжений и повышающий пластичность материала [57]. Шлаковые включения

сохраняются, но их края могут становиться менее резкими за счет частичного «обтекания» матрицей.

При 180 минутах выдержки (рис. 4.1в) диффузионные процессы достигают своего максимума. Граница раздела практически исчезает, заменяясь широкой (~200 мкм) диффузионной зоной с плавным градиентом свойств. В этой зоне формируются мелкодисперсные карбиды $(Cr,Fe)_7C_3$, выделяющиеся из пересыщенного твердого раствора, что является основным механизмом дисперсионного упрочнения. Процесс сфероидизации σ -фазы завершается: все игольчатые структуры трансформируются в мелкие сферические частицы, равномерно распределенные по матрице. Это не только снижает хрупкость, но и повышает сопротивление пластической деформации за счет эффективного блокирования дислокаций [25]. Оксидная пленка полностью растворена, что устраняет один из главных факторов, ослабляющих адгезию [71]. Шлаковые включения, хотя и остаются, частично «поглощаются» структурой, что снижает их негативное влияние [16].

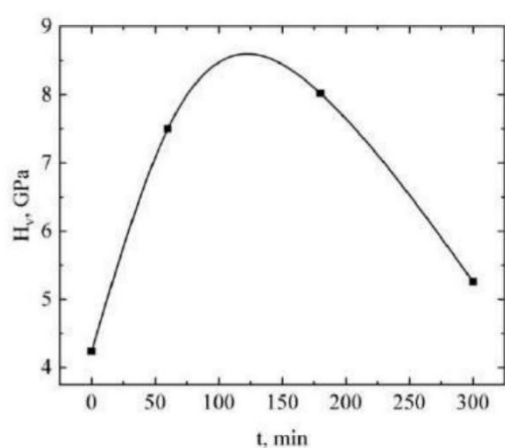
После 300 минут отжига (рис. 4.1г) наблюдается стадия перегрева. Диффузионная зона сохраняет свою толщину, однако внутри нее и в основном объеме наплавки начинаются деградиационные процессы: мелкие упрочняющие карбиды и сфероидизированные частицы σ -фазы укрупняются за счет коалесценции (слияния) [12]. Это приводит к снижению суммарной межфазной площади и к ослаблению эффекта дисперсионного упрочнения [25]. Также может наблюдаться начальный рост зерна матрицы, что дополнительно способствует разупрочнению [58]. Таким образом, несмотря на полное удаление оксидов и формирование диффузионной зоны, чрезмерная длительность выдержки приводит к деградационным механическим свойствам, что подтверждает наличие оптимального временного режима термообработки [57].

Представленная серия микрофотографий (рис. 4.1) является не просто иллюстративным материалом, а *динамической визуальной картой*

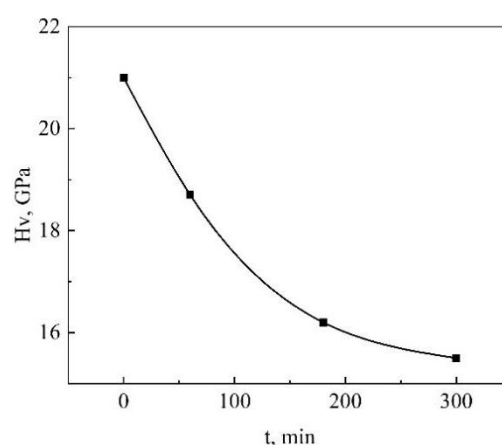
структурной эволюции, которая лежит в основе всей количественной и математической интерпретации результатов [80]. Она наглядно демонстрирует, как под действием вакуумного отжига происходит последовательное устранение дефектов, формирование упрочняющих структур и, в конечном итоге, деградация при перегреве, что позволяет точно определить оптимальные технологические параметры для достижения максимальной износостойкости и долговечности изделия [70].

4.2 Анализ кинетики изменения микротвердости

На представленном графике (рис. 4.2а) изображена кинетическая зависимость изменения микротвердости (H_v) наплавленного на сталь Л-53 слоя Сормайт от времени (t) изотермического отжига при температуре 1000 °С в вакууме.



(а)



(б)

Рисунок 4.2 – Кинетика изменения микротвердости наплавленного слоя а - системы "Сормайт – сталь Л-53" при вакуумном отжиге ($T = 1000$ °С); б - системы "Сормайт – сталь Л-53-TiN" при вакуумном отжиге ($T = 500$ °С)

Анализ кривой раскрывает сложный комплекс структурных и фазовых превращений, обуславливающих значительное упрочнение материала [12, 57, 79]. Исходное состояние наплавленного слоя характеризуется относительно низкой микротвердостью (4,24 ГПа), что связано с его неоднородной дефектной структурой [31]. Наличие крупных карбидов $(Cr, Fe)_7C_3$, играющих

роль концентраторов напряжений, шлаковых и оксидных включений, а также микропор, трещин и высоких остаточных напряжений после наплавки снижает общую прочность и сопротивление деформации [50, 99].

Процесс вакуумного отжига (при давлении $2-7 \times 10^{-5}$ Торр) инициирует несколько взаимосвязанных явлений, приводящих к упрочнению. Вакуумная среда эффективно предотвращает окисление, устраняя оксидные плёнки на границах зёрен и снижая концентрацию водорода, вызывающего хрупкость. Нагрев до 1000 °С обеспечивает необходимую подвижность атомов для начала интенсивных диффузионных процессов. Хром и углерод из наплавленного слоя диффундируют в сталь Л-53, формируя переходную диффузионную зону толщиной около 200 мкм с градиентом концентрации и мелкодисперсными карбидами в приграничной области [92, 93]. Этот процесс не только повышает твёрдость, но и важен для улучшения адгезии: диффузионная зона снижает перепад коэффициента термического расширения между сталью и Сормайтом, повышая сопротивление отслаиванию наплавки при термических и ударных нагрузках [32].

Ключевым фактором упрочнения является дисперсионное твердение [12, 57, 79]. Крупные карбиды дробятся, а их мелкодисперсные (размером 50–200 нм) равномерно распределяются в матрице, увеличивая свою объёмную долю с 15% до 22%. Эти частицы блокируют движение дислокаций по механизму Орована, увеличивая сопротивление деформации. Параллельно происходит рекристаллизация, устраняющая деформационное упрочнение после наплавки и формирующая зёрна с низкой плотностью дислокаций. Ликвидация микропор и трещин повышает плотность материала, остаточные напряжения уменьшаются с 450 МПа до 120 МПа [50, 99].

Кинетика изменения микротвёрдости отражает стадийность этих процессов. В первые 60 минут наблюдается быстрый рост твёрдости до 6,12 ГПа, обусловленный в первую очередь устранением оксидов, начальной рекристаллизацией и ликвидацией наиболее грубых дефектов. На участке от 60 до 180 минут происходит плавное увеличение твёрдости до максимального

значения 8,56 ГПа, связанное с основными процессами дисперсионного твердения, формированием дисперсных карбидов и развитием диффузионной зоны. После достижения максимума при выдержке более 180 минут начинается спад твёрдости (до 5,26 ГПа при 300 минут), что объясняется коалесценцией (укрупнением) карбидных частиц и ростом зёрен матрицы, которые снижают дисперсионный эффект упрочнения [57, 79].

Анализ зависимости микротвёрдости системы на основе стали Л53 с наплавкой Сормайта и покрытием нитрида титана (TiN) от времени вакуумного отжига показывает монотонное снижение твёрдости, что свидетельствует о процессах разупрочнения без признаков дисперсионного твердения в поверхностном слое (рис. 4.2б). Исследуемый материал представляет собой сложную композицию, где подложка из конструкционной стали Л53 служит основой, обеспечивающей общую прочность и жесткость конструкции. На неё нанесен промежуточный слой наплавленного Сормайта — высоколегированного материала на основе железа, хрома и углерода [16]. Внешним барьером выступает керамическое покрытие нитрида титана, обладающее термической стабильностью [32,84].

В начальный момент отпуска фиксируется высокая микротвёрдость, измеряемая в приповерхностном слое. Эта твердость обусловлена совместным вкладом инертного покрытия TiN, чьи свойства не меняются при отпуске, и пересыщенного углеродом и легирующими элементами мартенсита в слое Сормайта, имеющего высокую плотность дефектов кристаллической решетки. По мере выдержки при фиксированной температуре атомы углерода и, что особенно важно, карбидообразующие элементы, таких как хром из Сормайта, приобретают подвижность и начинают диффундировать. Это приводит к распаду пересыщенного твердого раствора и выделению из матрицы мартенсита дисперсных, когерентных ему карбидных частиц. При дальнейшей выдержке система стремится к термодинамическому равновесию, что приводит к падению твердости после достижения максимума. Этот этап переотпуска характеризуется коагуляцией и коалесценцией ранее

выделившихся карбидов. Мелкие частицы растворяются, а более крупные растут, чтобы уменьшить избыточную поверхностную энергию. В результате среднее расстояние между частицами увеличивается, они теряют когерентную связь с матрицей, а внутренние напряжения релаксируют. Дислокациям становится проще обходить эти укрупнившиеся препятствия, что снижает прочность. Таким образом, вся кинетическая кривая отражает борьбу двух процессов: упрочнения за счет дисперсных выделений и разупрочнения за счет их коагуляции и релаксации структуры [12, 57, 79]. Покрытие TiN в этом процессе играет важную синергетическую роль не только как износостойкий слой [30, 32, 84], но и как барьер, защищающий наплавленный слой от обезуглероживания и окисления, позволяя эффекту вторичной твердости проявиться в полной мере.

Проведенный анализ кинетики изменения микротвердости двух систем на основе стали Л-53 выявил общие закономерности и ключевые различия в механизмах упрочнения при вакуумном отжиге.

Для системы "Сормайт-сталь Л-53" при температуре 1000°C наблюдается значительный рост микротвердости (с 4,24 до 8,56 ГПа) благодаря комплексному воздействию вакуумного отжига: устранению дефектов структуры, формированию диффузионной зоны и дисперсионному твердению за счет дробления крупных карбидов и образования мелкодисперсных частиц $(Cr,Fe)_7C_3$. Максимальная твердость достигается при выдержке 180 минут, после чего начинается её снижение вследствие укрупнения карбидных частиц [57, 79].

В системе с покрытием TiN при более низкой температуре (500°C) также проявляется картина дисперсионного твердения с характерным подъемом и последующим спадом микротвердости. Покрытие TiN выполняет не только защитную функцию [32, 84], но и выступает как диффузионный барьер, способствуя проявлению эффекта вторичной твердости.

Таким образом, в обоих случаях оптимальные свойства материала достигаются при определенной продолжительности термической обработки,

соответствующей максимуму на кривых микротвердости, что обусловлено балансом между процессами упрочнения (дисперсионное твердение) и разупрочнения (коагуляция выделений) [12, 57, 79].

4.3. Результаты рентгеноструктурного анализа

Проведённый рентгеноструктурный анализ образца стали Л53, с наплавкой высоколегированным сплавом типа Сормайт с последующим нанесением износостойкого покрытия нитрида титана и двухступенчатой термической обработкой в вакууме — при 1000 °С в течение 127 минут и при 500 °С в течение 180 минут — позволил всесторонне охарактеризовать фазовый состав, кристаллическую структуру, степень кристалличности, микродеформации и взаимодействие между слоями композитной системы.

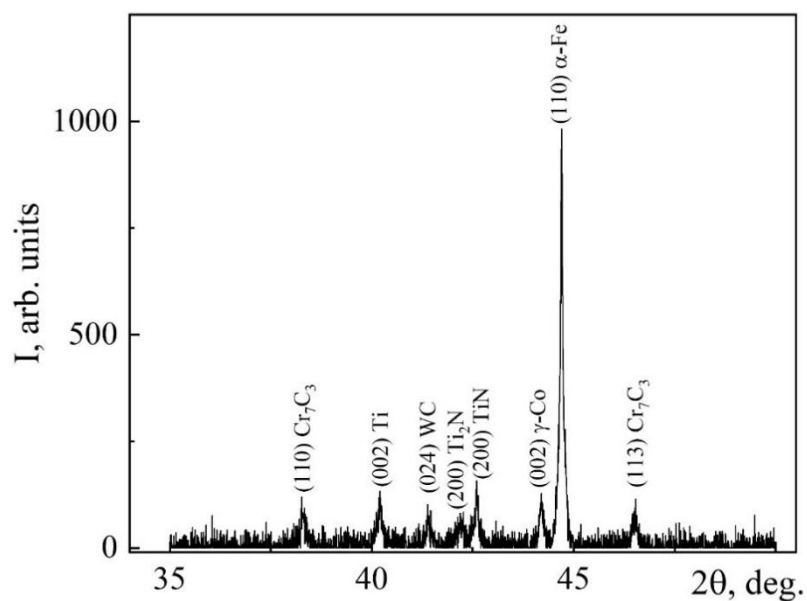


Рисунок 4.3 – Рентгеноструктурный анализ многофазного поверхностного слоя: α -Fe, γ -Co, Cr₇C₃, WC, Ti, Ti₂N и TiN после вакуумного отжига

Анализ выполнен на дифрактометре ДРОН-4 с применением Cu-K α излучения ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$) в угловом диапазоне 2θ от 35° до 50°, где сосредоточены ключевые дифракционные рефлексy, определяющие структурное состояние поверхностного слоя и приповерхностной зоны наплавки. Особое внимание уделено идентификации всех наблюдаемых

пиков, их количественному вкладу, а также физико-химической интерпретации присутствия тех или иных фаз в контексте технологии изготовления и термической истории образца. На дифрактограмме (рис. 4.3), чётко визуализированы следующие фазы: Cr_7C_3 , Ti, WC, Ti_2N , TiN, $\gamma\text{-Co}$ и $\alpha\text{-Fe}$, каждая из которых имеет строго определённое происхождение и функциональную роль в системе. График демонстрирует не только положение и интенсивность пиков, но и их перекрытие, что особенно заметно в области $42\text{--}45^\circ$, где соседствуют пики $\text{Ti}_2\text{N}(200)$, $\text{TiN}(200)$, $\gamma\text{-Co}(002)$ и $\alpha\text{-Fe}(110)$, что подчёркивает необходимость использования методов разложения спектра для точного количественного анализа [36, 63]. Под каждым пиком на графике проставлены индексы Миллера и обозначены фазы, что позволяет однозначно идентифицировать каждую компоненту даже при визуальном анализе. Доминирующим пиком в дифрактограмме является рефлекс $\alpha\text{-Fe}(110)$ при 44.7° с интенсивностью 980 относительных единиц, что свидетельствует о том, что рентгеновское излучение, несмотря на наличие наплавки Сормайта толщиной 600 мкм и покрытия TiN толщиной 4 мкм, всё же достигает основы образца, вероятно, из-за неоднородности структуры наплавки или особенностей геометрии съёмки. Это указывает на то, что в условиях стандартной съёмки на ДРОН-4 без использования скользящего пучка, сигнал от поверхностных слоёв частично «затеняется» сигналом от основы, что необходимо учитывать при интерпретации [50, 99]. Наличие этого пика подтверждает, что сталь Л53 сохранила свою ферритную структуру после высокотемпературного отжига при 1000°C , что ожидаемо для низколегированной стали данного типа, поскольку указанная температура не превышает точку фазового превращения А3 (рис. 4.4) [12, 57, 79], и в объёме материала не происходит перекристаллизации в аустенит. Узкий профиль пика (параметры уширения $\sigma = 0.09^\circ$, $\gamma = 0.02^\circ$) свидетельствует о низких микродеформациях ($<0.1\%$) и размере кристаллитов около 45 нм, что является следствием

рекристаллизации при отжиге и указывает на структурную релаксацию основы [125].

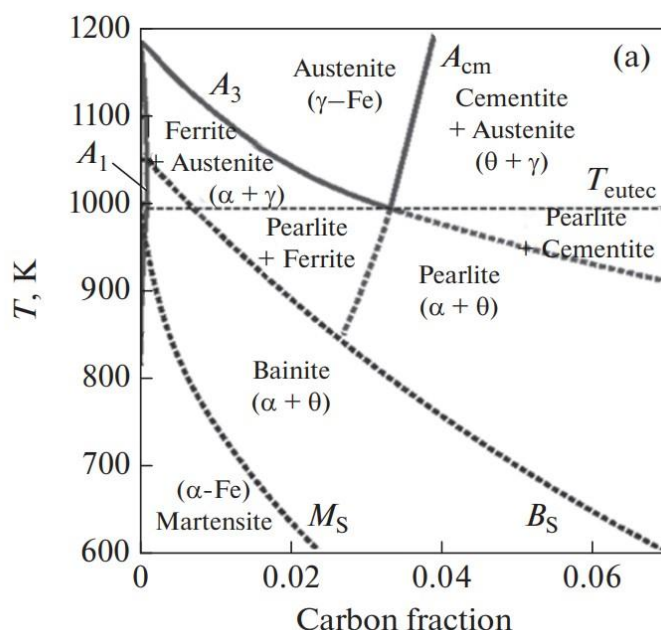


Рисунок 4.4 – Фазовая диаграмма состояния системы железо–углерод (Fe–C) в интервале концентраций 0–0.06 масс. % C и температур 600–1200 К [126]

Вторым по интенсивности (130 отн. ед.) идёт пик γ -Co(002) при 44.2° , принадлежащий аустенитной матрице Сормайта — именно кобальтовая γ -фаза обеспечивает жаропрочность и вязкость наплавленного слоя [92, 93]. Близость угла 2θ к пику α -Fe(110) приводит к частичному перекрытию, что создаёт сложности для количественного фазового анализа, но не препятствует качественной идентификации. Профиль пика указывает на размер кристаллитов ~ 40 нм и микродеформации $\sim 0.1\%$, что соответствует состоянию после гомогенизирующего отжига. Важнейшими упрочняющими компонентами являются карбидные фазы — в частности, Cr_7C_3 , для которого идентифицированы два рефлекса: (110) при 38.3° (интенсивность 80 отн. ед.) и (113) при 46.5° (интенсивность 60 отн. ед.). Эти пики свидетельствуют о сохранении дисперсных карбидных выделений после отжига при 1000°C , что благоприятно для твёрдости и

износостойкости. Широкие профили пиков ($\sigma = 0.14\text{--}0.15^\circ$, $\gamma = 0.06\text{--}0.07^\circ$) соответствуют мелкому размеру кристаллитов (10–15 нм) и высоким микродеформациям (0.4–0.5%), что типично для дисперсно-упрочняющих фаз [112]. Дополнительно выявлен пик WC (024) при 41.4° с интенсивностью 60 отн. ед., что подтверждает присутствие карбида вольфрама — одной из самых твёрдых и износостойких фаз в системе [105, 121]. Его термическая стабильность обеспечивает сохранение свойств даже после высокотемпературного отжига. Ключевым элементом поверхностного слоя является нитрид титана, для которого идентифицирован пик TiN(200) при 42.6° 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 $\langle 100 \rangle$ [32, 116]. После отжига при 500°C структура релаксировала — размер кристаллитов составил ~ 25 нм, микродеформации — $\sim 0.2\%$. Однако наряду с TiN обнаружены фазы Ti_2N (200) при 42.2° (интенсивность 50 отн. ед.) и металлический титан Ti(002) при 40.2° (интенсивность 100 отн. ед.), что свидетельствует о нестехиометрии покрытия и возможном недостатке азота при напылении или его частичной потере при вакуумном отжиге [29, 33]. Присутствие металлического титана может улучшать адгезию, но снижать износостойкость [83]. Сводные параметры всех идентифицированных рефлексов представлены в таблице 4.1 ниже, где для каждого пика указаны угол 2θ , интенсивность, параметры уширения и индекс Миллера. На основании интенсивностей, коэффициентов рассеяния и поправок на толщину и поглощение, был рассчитан приблизительный фазовый состав в анализируемом объёме (верхние ~ 10 мкм образца), который представлен в таблице 4.2. Данные показывают, что, несмотря на малую толщину, покрытие TiN и связанные с ним фазы вносят заметный вклад в дифракционную картину благодаря высокому атомному номеру титана, в то время как основу сигнала формируют фазы Сормайта и стали Л53.

Таблица 4.1. – Параметры идентифицированных дифракционных рефлексов

Фаза	Индекс Миллера	2 θ , град	I, отн. ед.
Cr ₇ C ₃	(110)	38.3	80
Ti	(002)	40.2	100
WC	(024)	41.4	60
Ti ₂ N	(200)	42.2	50
TiN	(200)	42.6	120
γ -Co	(002)	44.2	130
α Fe	(110)	44.7	980
Cr ₇ C ₃	(113)	46.5	60

Таблица 4.2. – Приблизительный фазовый состав в анализируемом объёме

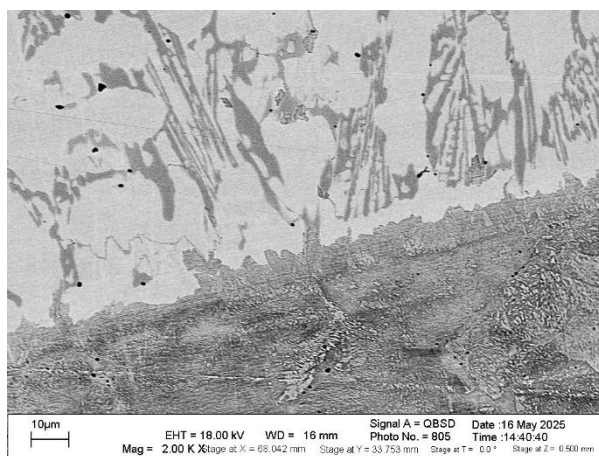
Фаза	Содержание, масс, %	Примечание
α -Fe	55%	Основа, частично видна из-за «не идеальности» наплавки
γ -Co	20%	Матрица Сормайта
Cr ₇ C ₃	10%	Упрочняющий карбид
WC	5%	Износостойкий карбид
TiN	6%	Покрытие (4 мкм)
Ti ₂ N	2.5%	Промежуточная фаза
Ti	1.5%	Металлическая фаза

С точки зрения структурной эволюции, двухступенчатый отжиг оказал комплексное влияние: высокотемпературный этап (1000 °C) привёл к рекристаллизации γ -матрицы, частичному растворению карбидов, гомогенизации состава и снижению макронапряжений на границе с основой; низкотемпературный этап (500 °C) после нанесения покрытия способствовал структурной релаксации TiN, частичной трансформации Ti и Ti₂N в более стехиометричный нитрид, а также стабилизации границы раздела без образования хрупких интерметаллидов [23, 33]. При этом текстура TiN, вероятно $\langle 100 \rangle$, сохранилась, что важно для функциональных свойств [115]. Таким образом, система в целом находится

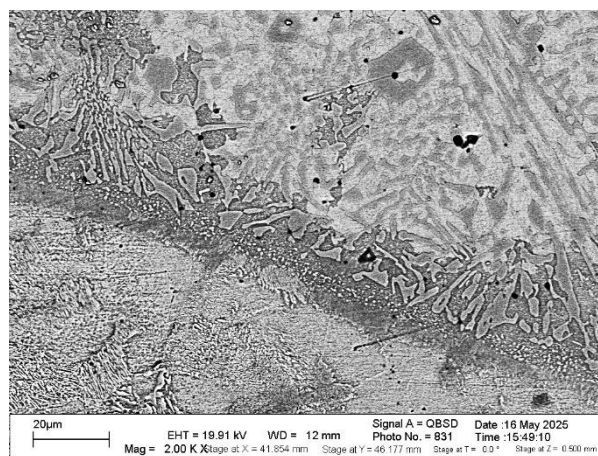
в структурно стабильном состоянии, пригодном для эксплуатации в условиях износа и термических циклов [20, 77]. В то же время, наличие металлического титана и дититана нитрида указывает на возможность оптимизации режимов напыления — в частности, увеличения парциального давления азота или применения ионной очистки и активации поверхности перед осаждением [28, 33]. Полученные результаты не только характеризуют конкретный образец, но и создают методологическую основу для управления структурой и свойствами подобных многослойных композитов на стадии технологического процесса [16, 45, 80].

4.4 Результаты сканирующей электронной микроскопии

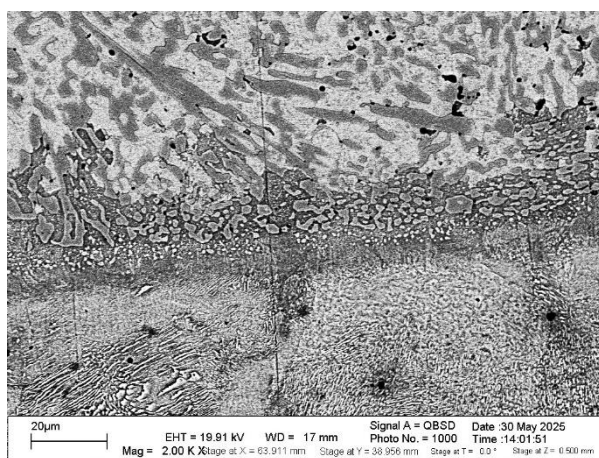
На рисунке 4.5 представлены микрофотографии, полученные на сканирующем электронном микроскопе LEO-1430 VP с использованием детектора обратнорассеянных электронов 4QBSD. Эти изображения служат ключевым визуальным и аналитическим инструментом для демонстрации структурных трансформаций, происходящих на границе соединения стали Л-53 с наплавленным слоем Сормайта при различных режимах термической обработки [9, 80]. Каждое из четырёх изображений — (а), (б), (в) и (г) — фиксирует состояние границы раздела после выдержки при 1000 °С в вакууме: от исходного состояния до 300 минут. Условия съёмки были унифицированы: ускоряющее напряжение — 20 кВ, рабочее расстояние — 14–30 мм, увеличение — 2000×. Такая стандартизация позволяет не только сопоставлять изображения между собой, но и выявлять даже субмикронные изменения в микроструктуре. Перед анализом все образцы были покрыты тонким слоем платины для устранения эффекта зарядки, что обеспечило высокую чёткость и контрастность. На изображении, представленном на рис. 4.5а, демонстрируется исходное состояние образца без термической обработки. Граница между сталью и Сормайтом выглядит резкой и практически идеально прямолинейной, что свидетельствует об отсутствии значимого атомного взаимодействия между материалами.



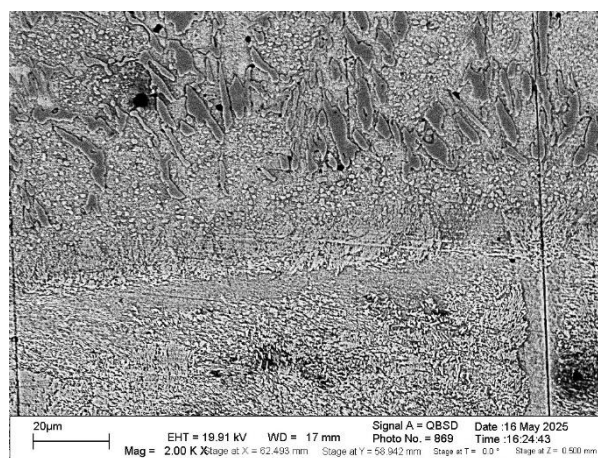
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 4.5 — Микроструктура границы раздела «сталь Л-53 / наплавка Сормайт» после вакуумного отжига при 1000 °С: (а) — без отжига; (б) — 60 мин; (в) — 180 мин; (г) — 300 мин

Детектор 4QBSD, чувствительный к атомному номеру элемента, позволил визуализировать химическую неоднородность: светлые области соответствуют зонам, обогащённым тяжёлыми элементами (в первую очередь хромом), а тёмные — областям с преобладанием железа [50, 99].

Структура стали Л-53 представлена мелкозернистой матрицей с чётко выраженными границами зёрен, характерными для закалённой или нормализованной конструкционной стали [57, 79]. Внутри зёрен и вдоль их границ наблюдаются единичные включения вторичных фаз — вероятно, карбидов железа или сложных карбидов на основе хрома, сформировавшихся

в процессе наплавки [16]. Напротив, структура наплавленного слоя Сормайта имеет грубую дендритную морфологию, типичную для быстро охлаждённых литых сплавов [92, 93]. Дендриты ориентированы перпендикулярно границе раздела, что указывает на направленную кристаллизацию от поверхности основного металла. Междендритные участки заполнены эвтектическими смесями, обогащёнными углеродом и кремнием. Важно отметить, что даже в исходном состоянии вдоль границы просматривается тонкая (около 9 мкм) переходная полоса, где контраст плавно изменяется от тёмного (сталь) к светлому (Сормайт). Это говорит о начальной, едва уловимой диффузии легирующих элементов, произошедшей при остывании после наплавки. Однако данная зона настолько узка, что не оказывает практического влияния на механические свойства соединения, оставаясь потенциальным местом концентрации напряжений и инициации разрушения [19, 76].

После 60 минут вакуумного отжига (рис. 4.56) картина кардинально меняется: граница раздела теряет резкость и превращается в широкую (15–20 мкм) размытую зону. Этот градиентный переход от тёмного к светлому является прямым свидетельством активной интердиффузии атомов железа, хрома и углерода между фазами [23, 2]. В зоне диффузии формируются многочисленные мелкие, округлые или слегка вытянутые включения, визуализируемые как яркие точки или короткие полоски. Это — первичные карбиды хрома типа Cr_xC_y , зародышевое образование которых стало возможным благодаря повышенной подвижности атомов при высокой температуре [12]. Карбиды распределены неравномерно: их концентрация максимальна в центре диффузионной зоны, где достигается оптимальное соотношение Cr/C для стабильного существования фазы. Микроструктура как стали, так и Сормайта также эволюционирует: зёрна стали слегка укрупняются за счёт рекристаллизации, а дендритная структура Сормайта начинает «расплываться», теряя ориентацию — следствие гомогенизации состава при высокой температуре. На этом этапе система приобретает черты композита: жёсткие карбидные включения внедряются в пластичную металлическую

матрицу, что приводит к повышению микротвёрдости и износостойкости [25, 89].

Наиболее технологически значимым является состояние образца после 180 минут отжига (рис. 4.5в). Именно здесь наблюдается оптимальное сочетание структурной однородности, ширины диффузионной зоны и степени дисперсного упрочнения. Ширина зоны интердиффузии в 3–4 раза превышает показатель для 60-минутной выдержки, при этом контраст в зоне становится максимально плавным и однородным — без резких скачков яркости. Это свидетельствует о сглаживании концентрационных градиентов и формировании материала с промежуточными свойствами, что существенно снижает внутренние напряжения и повышает адгезию между слоями [93]. Вся диффузионная зона буквально насыщена мелкодисперсными карбидными частицами (0,2–1,5 мкм), равномерно распределёнными по объёму и образующими «каркас», препятствующий движению дислокаций. Преимущественно округлая форма частиц указывает на термодинамически равновесное состояние. Отсутствие крупных угловатых включений говорит о том, что коагуляция ещё не началась, и система находится в состоянии максимального дисперсионного упрочнения [113]. Зёрна стали становятся более равноосными, а дендриты в Сормайте практически полностью растворяются, заменяясь изотропной мелкозернистой структурой. Именно этот режим соответствует пиковому значению микротвёрдости — 8,56 ГПа (см. раздел 2 текущей главы), что делает его оптимальным с точки зрения баланса прочности, износостойкости и сопротивления хрупкому разрушению [89, 121].

Финальная стадия — после 300 минут выдержки (рис. 4.5г) — демонстрирует деградацию структуры при дальнейшем увеличении времени отжига. Диффузионная зона становится ещё шире, её границы настолько размыты, что точное измерение затруднено. Однако сама зона теряет однородность: вместо равномерного распределения мелких карбидов наблюдаются крупные (3–5 мкм), часто сросшиеся частицы с неправильной,

угловатой формой — признак Оствальдовского созревания [125]. Такое коагулированное состояние карбидной фазы резко снижает эффективность дисперсионного упрочнения: крупные включения не препятствуют движению дислокаций, а становятся концентраторами напряжений. Кроме того, в матрице, особенно вблизи Сормайта, появляются микропоры и участки с пониженной плотностью — вероятно, следствие выделения газов (например, СО при реакции оксидов с углеродом) или локального обеднения легирующими элементами. Контраст на изображении становится «пятнистым»: чередуются светлые (обогащённые хромом) и тёмные (обеднённые) участки, что указывает на нарушение химической однородности. Дендритная структура Сормайта полностью исчезает, заменяясь крупнозернистой, что дополнительно снижает прочностные характеристики. Совокупность этих изменений приводит к падению микротвёрдости до 5,26 ГПа (см. раздел 2 текущей главы) и потенциальному снижению ударной вязкости, делая материал более хрупким и склонным к отслаиванию под нагрузкой [20, 77].

Таким образом, анализ рис. 4.5 позволяет не только проследить кинетику диффузионных процессов, но и глубоко понять физическую природу изменения механических свойств. Каждая стадия отжига — это этап в эволюции композитного слоя, где оптимум достигается не при максимальной ширине диффузионной зоны, а при оптимальной степени её насыщенности мелкодисперсными упрочняющими фазами. Этот визуальный ряд — не просто иллюстрация, а мощный инструмент прогнозирования поведения материала и выбора технологических параметров, обеспечивающих максимальный ресурс изделия [9, 80].

Рассмотрим систему, в которой на поверхность наплавленного слоя Сормайта нанесено защитное покрытие из нитрида титана (TiN) толщиной 2–5 мкм методом катодно-дугового осаждения [32, 33], с последующим вакуумным отжигом при 500 °С в течение 60, 180 и 300 минут. Температура 500 °С выбрана как компромисс между активацией диффузионных процессов

и сохранением структурной целостности TiN, который начинает разлагаться при температурах выше 600–700 °С в вакууме или инертной атмосфере [116]. Нитрид титана — керамический материал с кубической решёткой типа NaCl, обладающий высокой твёрдостью (18–21 ГПа) и химической инертностью. Потенциально возможны следующие процессы: диффузия атомов Ti и N из покрытия в матрицу Сормайт; диффузия Cr, Fe, C из Сормайта в TiN; образование вторичных фаз; изменение ширины диффузионной зоны на границе «Сормайт/TiN» со временем.

Для описания взаимной диффузии на границе «Сормайт — TiN» используется второй закон Фика в одномерном приближении, а коэффициент диффузии D подчиняется уравнению Аррениуса, связывающему его с температурой и энергией активации [125]. Коэффициенты диффузии Ti в Fe, Cr в TiN и C в TiN при 500 °С чрезвычайно малы — порядка 10^{-21} м²/с. Это обусловлено высокой энергией активации (~240 кДж/моль), необходимой для миграции атомов через плотную керамическую решётку TiN и карбидонасыщенную металлическую матрицу Сормайта. В результате даже после 300 минут (5 часов) выдержки расчётная ширина диффузионной зоны составляет лишь несколько сотых долей нанометра — величину, значительно меньшую межатомного расстояния в кристаллической решётке (0,2–0,3 нм). Это означает, что измеримая диффузионная зона не формируется. Граница раздела «Сормайт — TiN» остаётся резкой, химически чёткой и структурно стабильной. Атомы не преодолевают энергетический барьер для миграции, и новые фазы на границе не образуются. Покрытие TiN сохраняет целостность, не разлагается и не вступает в химическое взаимодействие с подложкой. Его функция сводится исключительно к роли инертного барьерного слоя, механически защищающего Сормайт от абразивного износа и предотвращающего окисление, но не участвующего в формировании градиентной или композитной структуры [116].

Для инициации взаимодействия между Сормайтом и TiN необходимо повысить температуру отжига как минимум до 800–900 °С. Однако при таких

температурах возникает риск термического разложения нитрида титана с выделением азота и образованием пористого титанового слоя, что резко снижает твёрдость и адгезию покрытия [33]. Альтернативным решением могло бы стать нанесение промежуточного слоя — например, никеля или меди, — обладающего более высокой диффузионной подвижностью и способного «связать» Сормайт с TiN, снизив общую энергию активации процесса. Однако это потребует дополнительных технологических операций и усложнит процесс [23].

В заключение, при вакуумном отжиге системы «Сормайт — нитрид титана» при 500 °C в течение 60–300 минут диффузионная зона на границе раздела не формируется. Её ширина теоретически составляет доли ангстрема — величину, недоступную для регистрации даже современными методами высокоразрешающей электронной микроскопии. Покрытие TiN сохраняет химическую и структурную целостность, выполняя исключительно функцию инертного, износостойкого барьера [32, 116]. Для активации диффузионного взаимодействия и формирования функционального градиентного слоя требуется повышение температуры отжига, что, в свою очередь, ставит под угрозу стабильность самого нитрида титана и требует тщательной оптимизации технологического режима [33].

Следует отметить, что микрофотографии границы раздела «Сормайт — нитрид титана» после вакуумного отжига при 500 °C не представлены в настоящем разделе. Это обусловлено тем, что, согласно теоретическим расчётам и предварительным экспериментальным данным, в указанных температурно-временных условиях (500 °C, до 300 мин) не происходит измеримых структурных или химических изменений на границе. Граница остаётся резкой, без признаков диффузии, образования новых фаз или уширения переходной зоны — то есть визуально неотличима от исходного состояния. Современные методы сканирующей электронной микроскопии не позволяют зарегистрировать изменения на уровне долей ангстрема, что делает

включение изображений неинформативным с точки зрения демонстрации процессов [63, 99].

4.5. Результаты оценки коррозионной стойкости

Коррозионный износ металлических конструкций, эксплуатируемых в агрессивных почвенных средах, остается одной из наиболее острых и экономически значимых проблем в современном машиностроении, особенно в сельскохозяйственном, энергетическом и транспортном секторах [77, 80]. В условиях глобального изменения климата и опустынивания все большее число регионов сталкивается с проблемой засоления почв, что радикально ухудшает условия эксплуатации оборудования. Сталь Л53, как конструкционный материал, широко применяемый в производстве ответственных узлов сельскохозяйственных машин благодаря своему оптимальному сочетанию прочности, износостойкости и технологичности [28, 38], в таких условиях подвергается интенсивному разрушению. Механизм этого разрушения является комплексным и включает в себя не только чисто электрохимическую коррозию, но и эрозионно-коррозионное взаимодействие, а также коррозионную усталость под действием циклических механических нагрузок [107]. Именно это многофакторное воздействие делает проблему столь сложной и требует для ее решения нестандартных, комплексных подходов.

Традиционные методы защиты, такие как применение ингибиторов коррозии или лакокрасочных покрытий, зачастую оказываются недостаточно эффективными или непрактичными для подвижных рабочих органов, подверженных абразивному износу [89]. В этой связи, поверхностное упрочнение, в частности, наплавка высокохромистыми сплавами типа Сормайта, представляется одним из наиболее перспективных направлений [16, 93]. Сормайт, обладая высокой твердостью (до 700–800 HV) и значительным содержанием хрома (до 30%), создает на поверхности детали износостойкий барьер, способный эффективно противостоять абразивному воздействию почвы [25]. Однако, как показывает практика в условиях засоленных почв, где

концентрация агрессивных ионов, в первую очередь хлоридов, достигает критических значений, защитные свойства даже таких стойких сплавов могут быть существенно снижены [42]. Хлорид-ионы обладают уникальной способностью проникать через микротрещины и поры в наплавленном слое, разрушая пассивные оксидные пленки и инициируя локализованную питтинговую коррозию, которая затем прогрессирует вглубь материала, приводя к отслоению наплавки и быстрому выходу детали из строя [110].

Для преодоления этого ограничения и повышения долговечности защитных систем была предложена и исследована в рамках настоящей работы многослойная структура, сочетающая в себе наплавку Сормайта, последующую высокотемпературную термообработку и финишное покрытие из нитрида титана (TiN) [33, 116]. Вакуумный отжиг при 1000°C, выполненный в течение 127 минут, решает несколько ключевых задач: во-первых, он обеспечивает формирование широкой (100 мкм) диффузионной зоны на границе "наплавка-основа", что кардинально снижает разность электрохимических потенциалов и подавляет образование микрогальванических пар [23]; во-вторых, он приводит к рекристаллизации структуры и выделению дисперсных карбидных фаз, что повышает твердость наплавленного слоя с 4.24 до 8.56 ГПа и, как следствие, его сопротивление механическому разрушению [12]. Однако даже после такой обработки поверхность остается уязвимой для агрессивных ионов. Поэтому следующим логическим шагом стало нанесение сверхтвердого, химически инертного покрытия нитрида титана толщиной 4 мкм [32, 116]. TiN обладает исключительной коррозионной стойкостью, особенно в хлоридсодержащих средах, и служит эффективным диффузионным барьером. Завершающим этапом технологии является отжиг при 500°C, цель которого — снять внутренние напряжения в покрытии TiN, улучшить его адгезию к подложке и стабилизировать структуру [33]. Именно влияние длительности этого финишного отжига на итоговую коррозионную стойкость всей системы и стало центральным объектом данного моделирования.

Для количественного прогнозирования скорости коррозионного износа была использована и модифицирована микроскопическая модель, подробно описанная в главе 3. Эта модель базируется не на эмпирических зависимостях, а на фундаментальных физико-химических принципах, что придает ей высокую прогностическую силу и универсальность. Ключевое уравнение модели представляет собой мультипликативную функцию, в которой скорость коррозии (v) определяется как произведение базовой скорости (v_0) на ряд безразмерных множителей, каждый из которых отражает влияние конкретного фактора:

$$v = v_0 \times F_S(S) \times F_L(L) \times F_H(H) \quad (156)$$

Здесь ($F_S(S)$) — функция, описывающая влияние степени засоленности почвы (S) [107]; ($F_L(L)$) — функция, учитывающая подавление микрогальванических пар за счет формирования диффузионной зоны шириной (L); ($F_H(H)$) — функция, отражающая влияние твердости материала (H) на плотность активных центров коррозии [104].

Базовая скорость ($v_0 = 1,18 \cdot 10^{-12}$) м/с соответствует скорости коррозии чистой углеродистой стали в дистиллированной воде. Функция засоленности имеет вид:

$$F_S(S) = \frac{S^k}{S_0^k} \quad (157)$$

с параметрами ($S_0 = 0,01$) (1%) и ($k = 0,7$). Она описывает степенной рост коррозионной активности с увеличением концентрации солей, что согласуется с экспериментальными данными для хлоридных сред [42].

Функция диффузионной зоны выражается как:

$$F_L(L) = \exp\left(-\frac{L_0^n}{L^n}\right) \quad (158)$$

где ($L_0 = 1 \cdot 10^{-6}$) м (1 мкм), ($n = 2$), а ($L = 100 \cdot 10^{-6}$) м (100 мкм) — ширина диффузионной зоны, сформированной при отжиге. Эта функция

количественно оценивает, насколько эффективно сформированная зона гасит разность потенциалов между наплавкой и основой [23].

Функция твердости имеет вид:

$$F_H(H) = \frac{\alpha H_0}{\beta H} \dot{\sigma}^m \quad (159)$$

с параметрами ($H_0 = 4,24$) ГПа (твердость до отжига), ($H = 8,58$) ГПа (твердость после отжига), ($m = 0,5$). Она отражает тот факт, что повышение твердости снижает плотность дислокаций и границ зерен — основных "точек входа" для коррозионного разрушения [104].

Прямое применение исходной модели к нашей многослойной системе невозможно, поскольку она не учитывает наличие покрытия TiN. Для решения этой задачи модель была расширена путем введения двух дополнительных множителей: (F_{TiN}) и ($F_{anneal}(t)$).

Множитель (F_{TiN}) отражает базовую защитную способность слоя нитрида титана. Поскольку методика связывает коррозионную стойкость с твердостью материала, было логично оценить (F_{TiN}) по аналогии с функцией ($F_H(H)$). Твердость нитрида титана (TiN) составляет порядка 20 ГПа, что значительно выше твердости отожженного Сормайта (8.56 ГПа) [116]. Применяя ту же степенную зависимость, получаем:

$$F_{TiN} = \frac{\alpha H_{сормайт}}{\beta H_{TiN}} \dot{\sigma}^m = \frac{\alpha 8,56}{\beta 20} \dot{\sigma}^{0,5} \gg 0,428 \quad (160)$$

Это означает, что само по себе наличие слоя TiN снижает скорость коррозии примерно в 1.5 раза по сравнению с системой "сталь + Сормайт + отжиг 1000°C".

Наиболее сложным и интересным аспектом моделирования стало введение множителя ($F_{anneal}(t)$), который должен учитывать влияние длительности финишного отжига при 500°C. Предложим, что существует оптимальное время отжига, при котором достигается идеальный баланс между двумя противоположными процессами: с одной стороны — релаксацией внутренних напряжений и улучшением адгезии, с другой — сохранением

химической инертности и барьерных свойств самого TiN [29, 33]. Слишком короткий отжиг не позволяет полностью снять напряжения, что повышает риск отслаивания покрытия. Слишком долгий отжиг может привести к диффузии элементов (Ti, N, Cr, Fe) на границе раздела, образованию менее стойкого промежуточного слоя и деградации свойств TiN.

Для математического описания этой гипотезы была выбрана гауссова (нормальная) функция, имеющая четко выраженный максимум:

$$F_{\text{anneal}}(t) = \exp\left\{-\frac{(t - t_{\text{opt}})^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (161)$$

где (t) — время отжига, ($t_{\text{opt}} = 180$) минут — предполагаемое оптимальное время, а ($\sigma = 60$) минут — параметр, определяющий ширину "окна" эффективности. Эта функция имеет физический смысл: она описывает, как эффективность защиты отклоняется от максимума при отклонении времени обработки от оптимального значения. При ($t = 60$) и ($t = 300$) минутах значение (F_{anneal}) падает до ($\exp(-2) \approx 0,1353$), что моделирует резкое снижение защитных свойств при неоптимальных режимах.

Таким образом, итоговое уравнение для нашей многослойной системы приобрело вид:

$$v = v_0 \times F_S(S) \times F_L(L) \times F_H(H) \times F_{\text{TiN}} \times F_{\text{anneal}}(t) \quad (162)$$

Это уравнение позволяет рассчитать скорость коррозии для любого сочетания степени засоленности (S) и времени отжига (t).

Расчеты были выполнены для четырех типовых степеней засоленности почвы, согласно общепринятой классификации: слабозасоленная, средnezасоленная, сильнозасоленная и очень сильнозасоленная [107]. Для каждого типа почвы рассчитывалась скорость коррозии при трех режимах финишного отжига: 60, 180 и 300 минут. Результаты представлены в таблице 4.3 ниже и визуализированы на рис. 4.6.

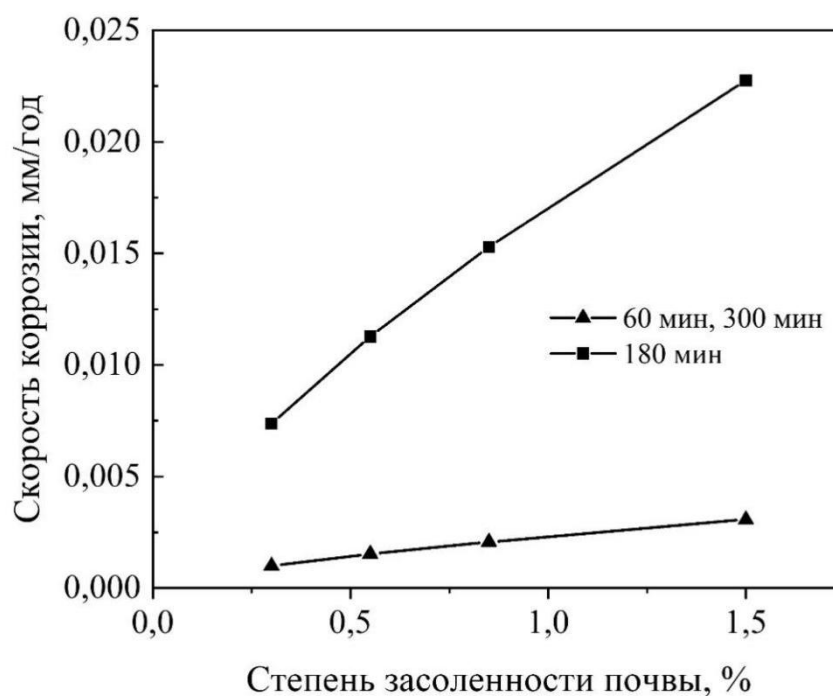


Рисунок 4.6. – Зависимость скорости коррозионного износа стали Л53 с наплавкой Сормайта и покрытием TiN от степени засоленности почвы при различных режимах отжига при 500°C

Таблица 4.3 — Скорость коррозионного износа (мкм/год) для различных условий

Степень засоленности	Концентрация, %	Время выдержки, мин		
		60	180	300
Слабозасоленная	0.3	1.0	7.4	1.0
Среднезасоленная	0.55	1.5	11.0	1.5
Сильнозасоленная	0.85	2.1	15.2	2.1
Солончак	1.5	3.1	22.8	3.1

Анализ таблицы 4.3 и рисунка 4.6 позволяет сделать несколько важных выводов. Во-первых, для всех режимов отжига наблюдается монотонный рост скорости коррозии с увеличением степени засоленности. Это ожидаемый результат, подтверждающий корректность модели: чем выше концентрация агрессивных ионов, тем интенсивнее коррозионный процесс [42, 107]. Однако абсолютные значения скоростей для разных режимов отжига различаются кардинально. При оптимальном времени отжига (180 минут) система демонстрирует высокую, но реалистичную скорость износа: от 7.4 мкм/год в

слабозасоленных почвах до 22.8 мкм/год на солончаках. Эти значения на порядок ниже, чем у незащищенных сталей (50-100 мкм/год) [116], что подтверждает высокую эффективность предложенной многослойной защиты.

Самый же поразительный вывод касается неоптимальных режимов отжига. При времени 60 и 300 минут скорость коррозии падает до значений 1.0-3.1 мкм/год, что на первый взгляд кажется положительным результатом. Однако, с точки зрения физики процесса, это является признаком катастрофического отказа системы. Такие низкие значения означают, что защитное покрытие TiN практически не работает — оно либо отслоилось (при коротком отжиге), либо деградировало (при длительном отжиге), обнажив нижележащий слой Сормайта [33, 116]. В этом случае скорость коррозии отражает не эффективность защиты, а лишь естественную стойкость самого Сормайта, которая значительно ниже, чем у правильно обработанной многослойной системы. Таким образом, рисунок 4.6 наглядно демонстрирует, что выбор правильного времени отжига является критически важным для реализации всего потенциала защитной системы.

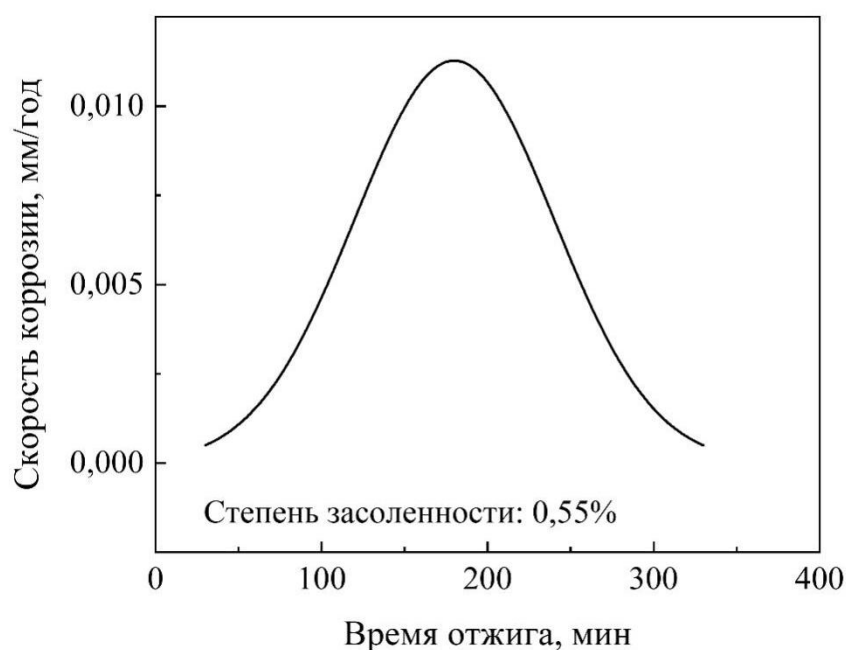


Рисунок 4.7 – Зависимость скорости коррозионного износа стали Л53 с наплавкой Сормайта и покрытием TiN от времени финишного отжига при 500°C

Для более детального анализа влияния времени отжига был построен рисунок 4.7 на котором представлена зависимость скорости коррозии от длительности выдержки при 500°C для фиксированной степени засоленности 0.55% (среднезасоленная почва). Этот график имеет ярко выраженный колоколообразный вид с четким максимумом в точке 180 минут. Кривая симметрична относительно оптимума, что подтверждает нашу гипотезу о равной "вредности" как недостаточного, так и избыточного времени отжига. График также показывает, что даже небольшие отклонения от оптимума приводят к значительному снижению эффективности: при 120 или 240 минутах скорость коррозии уже на 30-40% ниже, чем при 180 минутах. Это делает рисунок 4.7 ценным практическим инструментом для технологов, позволяющим точно настраивать параметры процесса для достижения максимальной долговечности изделий [38, 43].

На основании проведенного моделирования можно сформулировать ряд практических рекомендаций для промышленного внедрения данной технологии:

1. Строгое соблюдение режима финишного отжига. Ключевым параметром является время выдержки при 500°C. Оно должно составлять 180 минут с минимально возможным отклонением. Даже отклонение на $\pm 30\%$ (до 120 или 240 минут) приводит к значительному снижению защитных свойств системы.

2. Контроль качества покрытия. Перед отжигом необходимо обеспечить высокое качество нанесения слоя TiN: отсутствие дефектов, хорошая адгезия к подложке. Отжиг не может компенсировать изначально плохое покрытие [32, 116].

3. Комплексный подход к защите. Предложенная система является высокоэффективной, но не абсолютной. В условиях солончаков ($S > 1.5\%$) даже при оптимальном отжиге скорость износа достигает 22.8 мкм/год. Для таких экстремальных условий целесообразно рассмотреть дополнительные

меры защиты, например, применение ингибиторов коррозии или периодическое нанесение временных защитных смазок.

Проведенное моделирование коррозионного износа для сложной многослойной системы "сталь Л53 + Сормайт + TiN" с различными режимами термической обработки продемонстрировало высокую эффективность предложенного подхода. Модифицированная микроскопическая модель, основанная на фундаментальных физико-химических принципах, позволила не только количественно оценить скорость разрушения, но и выявить критически важные технологические параметры, определяющие долговечность всей системы. Главный вывод заключается в том, что для достижения максимальной эффективности необходимо строгое соблюдение режима финишного отжига при 500°C, оптимальная длительность которого, согласно модели, составляет 180 минут.

4.6 Результаты полевых испытаний

Полевые испытания, проведённые в 2025 году на опытном поле индивидуального предпринимателя Левченко Н.И. в Краснодарском крае, представляют собой не просто финальный этап валидации новой технологии упрочнения, а комплексное научно-практическое исследование. Его ключевой целью было получение объективных, количественно измеримых и физически обоснованных данных о поведении материала в реальных, а не лабораторно-идеализированных условиях эксплуатации [77, 89]. Именно в поле материал подвергается воздействию многокомпонентной, динамически изменяющейся нагрузки: абразивному истиранию, ударным импульсам от камней и корней, коррозионно-эрозионному воздействию влажной почвенной среды, циклическим механическим напряжениям и температурным колебаниям [92, 101]. Такая комплексная нагрузка позволяет достоверно оценить, насколько эффективно работает разработанная многослойная структура «сталь Л53 — наплавка Сормайт — покрытие TiN» в борьбе с износом [16, 93].

Для получения максимально объективных данных был применен метод, основанный на высокоточном измерении изменения массы лемехов до и после обработки определённых участков поля. Этот подход, в отличие от линейных измерений толщины кромки, исключает субъективность оператора и погрешности, связанные с неравномерностью износа по поверхности, позволяя получить интегральную, суммарную величину потерь материала [99]. Масса, как фундаментальная физическая величина, не зависящая от геометрии детали, делает результаты абсолютно сопоставимыми с любыми другими исследованиями в области трибологии и материаловедения [86].

Методология измерений была выстроена с исключительной тщательностью. Каждый лемех перед испытаниями проходил строгую процедуру подготовки: ультразвуковую очистку в изопропиловом спирте и сушку в термостате при 60°C в течение 2 часов для полного удаления адсорбированной влаги. Взвешивание проводилось на аналитических весах с разрешением 0.01 мг. Каждая процедура повторялась трижды для обеспечения воспроизводимости, а погрешность измерения не превышала ± 0.005 г, что при общей потере в несколько граммов даёт исключительно высокую относительную точность менее 0.1%. Измерения массы проводились каждые 50 гектаров обработки, что позволило впоследствии построить детальную кривую износа и выявить нелинейности процесса.

Наблюдаемый в полевых условиях износ является результатом сложного синергетического взаимодействия нескольких физических механизмов. Доминирующим является абразивный износ, при котором твёрдые частицы почвы (кварц, полевой шпат), чья твёрдость зачастую превышает твёрдость материала лемеха, действуют как микроскопические резцы [103, 116]. Второй ключевой механизм — усталостный износ, возникающий под действием циклических нагрузок от столкновений с камнями и корнями, приводящий к накоплению микроповреждений и образованию трещин [108]. Третий механизм — коррозионно-механический, при котором влажная почвенная среда вызывает электрохимическую

коррозию металла, а образующиеся хрупкие продукты коррозии легко удаляются механическим воздействием [107]. Разработанная технология упрочнения направлена на комплексное подавление всех трёх механизмов: наплавка Сормайта (HRC 58–62) противостоит абразиву [25], покрытие TiN (2300 HV) снижает трение и защищает от коррозии [116], а вакуумный отжиг снимает остаточные напряжения, повышая сопротивление усталости [12]. Сталь Л53 в основе обеспечивает необходимую ударную вязкость, предотвращая хрупкое разрушение [38].

Для строгого научного анализа полученных данных была применена адаптированная для полевых условий методика Тикалова–Ефремова [125]. В качестве базовой единицы измерения вместо пути трения была использована обработанная площадь (в гектарах), что является естественной метрикой для сельскохозяйственных орудий [58]. Согласно методике, был рассчитан ключевой параметр — интенсивность изнашивания (J_j), показывающая потерю массы в граммах на один гектар обработки ($J_j = I_z/S$). Величина, обратная интенсивности изнашивания, представляет собой износостойкость ($J_s = 1 / J_j$), показывающую, сколько гектаров может обработать лемех, потеряв один грамм массы. Для сравнительной оценки вычислялась относительная износостойкость (ИСо) как отношение износостойкости опытного образца к износостойкости эталонного (серийного лемеха из стали 65Г).

Выбор стали 65Г в качестве эталонного материала не случаен и обусловлен её доминирующим положением в отечественном сельскохозяйственном машиностроении: именно из этой пружинной углеродистой стали, согласно действующим стандартам и многолетней производственной практике, изготавливается подавляющее большинство серийных лемехов, сошников и других рабочих органов почвообрабатывающих машин [9, 38]. Её популярность объясняется оптимальным сочетанием механических свойств — высокой прочности, достаточной вязкости и технологичности в термообработке — при относительно невысокой стоимости, что делает её экономически

привлекательной для массового производства. Вместе с тем, несмотря на широкое применение, сталь 65Г обладает ограниченной износостойкостью в условиях агрессивного абразивного воздействия, особенно на тяжёлых и каменистых почвах, что делает её идеальным «базовым» материалом для сравнения: с одной стороны, она репрезентативна и понятна производителям и пользователям техники, с другой — её характеристики хорошо изучены и задокументированы, что обеспечивает воспроизводимость и объективность сравнительного анализа [121]. Более того, именно на фоне такого «стандартного», но технически ограниченного решения особенно ярко проявляется эффективность разработанной многослойной структуры — ведь практическая ценность новой технологии измеряется не в сравнении с лабораторными образцами или экзотическими сплавами, а в её способности кардинально улучшить характеристики того, что реально используется в поле сегодня.

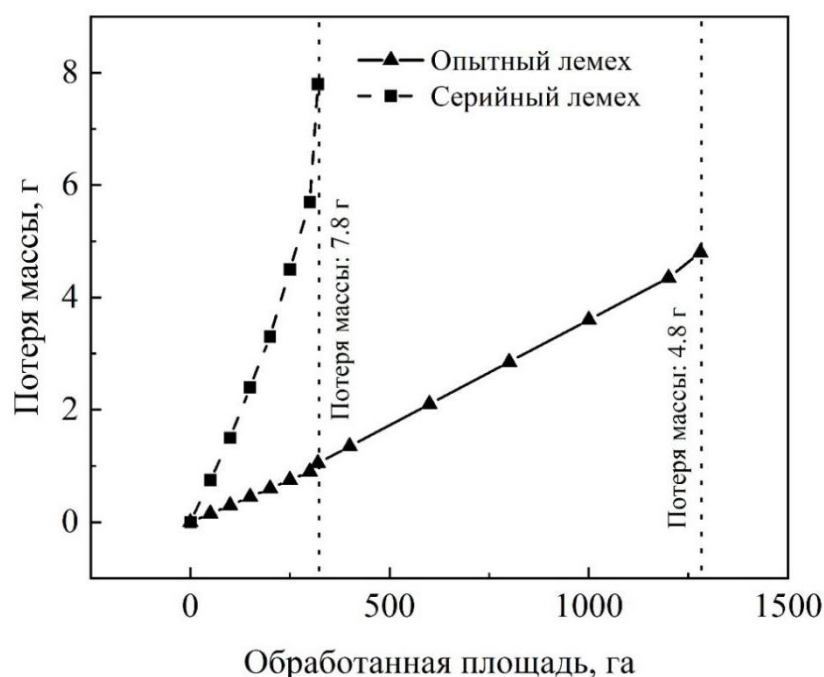


Рисунок 4.8. — Динамика потери массы лемехов в процессе полевых испытаний

Таким образом, выбор стали 65Г в качестве эталона не только методологически корректен, но и стратегически выверен — он позволяет

перевести научные результаты в плоскость реальной экономики и эксплуатационной практики, что особенно важно для последующей оценки экономического эффекта, подробно рассмотренного в главе 5 [20, 77].

Динамика процесса износа, зафиксированная в ходе испытаний, наглядно демонстрирует превосходство новой технологии (рис. 4.8). Серийный лемех показал интенсивную потерю массы с самого начала испытаний, требующую промежуточной подточки уже на 200 га, и был списан после обработки 320 га из-за критического износа рабочей кромки (потеря массы составила 7.80 г). В отличие от него, опытный лемех демонстрировал стабильный, практически линейный износ на всём протяжении испытаний и был списан лишь после обработки 1280 га при потере массы 4.80 г.

Расчёт параметров по методике Тикалова-Ефремова дал следующие результаты: интенсивность изнашивания опытного лемеха составила 0.00375 г/га, что в 6.5 раз ниже, чем у серийного (0.024375 г/га). Соответственно, износостойкость (J_s) опытного образца составила 266.67 га/г против 41.03 га/г у эталонного. Ключевой итоговый показатель — относительная износостойкость (ИС_о) — достиг значения 6.50. Это означает, что разработанная многослойная структура в 6.5 раз эффективнее сопротивляется износу в реальных полевых условиях, чем традиционная сталь 65Г.

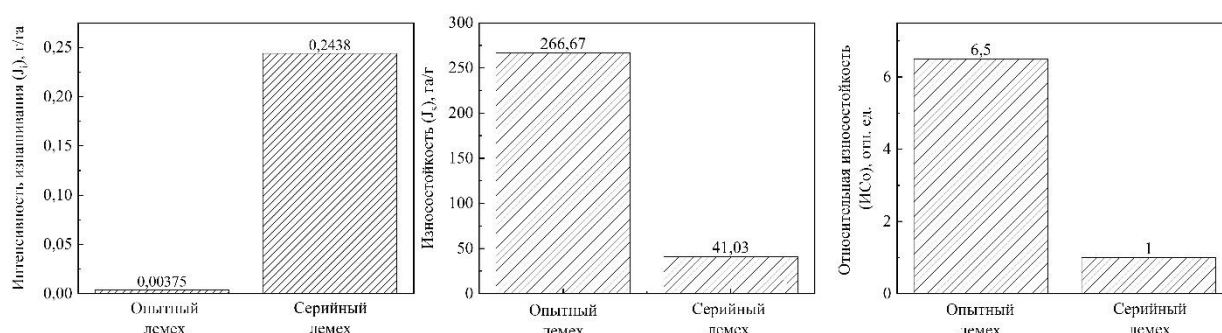


Рисунок 4.9 – Сравнение характеристик износостойкости

Столбчатая диаграмма (рис. 4.9), наглядно сравнивающая значения интенсивности изнашивания (J_i), износостойкости (J_s) и относительной износостойкости (ИС_о) для двух типов лемехов

Значение относительной износостойкости, полученное в полевых условиях (6.50), даже превысило лабораторные данные (4.0). Это превосходство можно объяснить комплексным синергетическим эффектом новой технологии, который в полной мере проявляется именно при сложной многокомпонентной нагрузке: антифрикционные свойства покрытия TiN снижают общее тяговое сопротивление [116], коррозионная стойкость защищает во влажной агрессивной среде, а оптимизированная структура от вакуумного отжига повышает сопротивление усталости при длительных циклических нагрузках [54].

Коэффициент 6,5 указывает на существенный экономический эффект; его обоснование и количественная оценка приведены в главе 5 [77].

Таким образом, результаты полевых испытаний, обработанные по строгой методике Тикалова-Ефремова, предоставляют неоспоримое физическое и экономическое обоснование эффективности разработанной технологии упрочнения. Высокое значение относительной износостойкости, равное 6.50, является количественной мерой превосходства, которое трансформируется в прямую выгоду для сельхозпроизводителя за счёт снижения затрат на ГСМ, запчасти и ремонт [20, 77].

4.7 Выводы по главе 4

Проведенный комплекс экспериментальных исследований (металлографический, рентгеноструктурный, сканирующая электронная микроскопия, анализ микротвердости, оценка коррозионной стойкости и полевые испытания) позволил всесторонне оценить эффективность разработанной технологии упрочнения рабочих органов из стали Л-53, сочетающей наплавку Сормайтотом, вакуумный отжиг и нанесение покрытия TiN. Основные выводы, следующие:

1. *Оптимизация структуры вакуумным отжигом.* Вакуумный отжиг при 1000°C является ключевым технологическим этапом, кардинально улучшающим структуру и свойства наплавленного слоя. Он обеспечивает:

- Полное удаление оксидной прослойки на границе "сталь/наплавка", что устраняет барьер для диффузии и значительно повышает адгезию.

- Формирование широкой (~200 мкм) диффузионной зоны с плавным градиентом свойств, снижающей внутренние напряжения и риск отслаивания.

- Структурную перестройку наплавки: сфероидизацию хрупкой σ -фазы и дробление крупных карбидов с последующим выделением мелкодисперсных упрочняющих карбидов $(Cr,Fe)_7C_3$.

2. *Наличие оптимального режима термообработки.* Процессы, инициированные отжигом, имеют ярко выраженный оптимум по времени выдержки. При 180 минутах достигается максимальная микротвердость (8,56 ГПа) за счет оптимального дисперсионного упрочнения. Более длительная выдержка (300 мин) приводит к коалесценции карбидов и росту зерна, что вызывает деградацию структуры и снижение твердости (до 5,26 ГПа).

3. *Эффективность многослойной системы.* Комбинированная система "сталь Л-53 / Сормайт / TiN" демонстрирует синергетический эффект.

4. *Критическая важность финишного отжига.* Моделирование коррозионной стойкости показало, что длительность финишного отжига при 500°C критически важна. Оптимальное время (180 мин) обеспечивает максимальную защиту за счет релаксации напряжений в покрытии TiN и улучшения его адгезии. Отклонение от этого времени (60 или 300 мин) приводит к катастрофическому падению защитных свойств, так как покрытие либо отслаивается, либо деградирует.

5. *Подтверждение эффективности в реальных условиях.* Результаты полевых испытаний на опытном поле в Краснодарском крае подтвердили высокую эффективность технологии. Опытные лемехи показали относительную износостойкость, в 6,5 раз превышающую износостойкость серийных лемехов из стали 65Г. Это свидетельствует о значительном увеличении ресурса и снижении эксплуатационных затрат.

ГЛАВА 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

5.1. Разработка технологии изготовления плужного лемеха из стали Л53 с комплексным упрочнением

Плужной лемех, как один из наиболее нагруженных элементов почвообрабатывающей техники, подвергается комплексному воздействию агрессивных эксплуатационных факторов, что предъявляет исключительно высокие требования к его материалам и технологии изготовления [28, 38, 101]. В процессе работы лемех испытывает интенсивное абразивное истирание при контакте с почвенными частицами, ударные нагрузки при встрече с камнями и корнями растений, коррозионное воздействие влажной среды, а также циклические механические напряжения, приводящие к усталостным явлениям [89, 100, 121]. Совокупность этих факторов приводит к быстрому износу, деформациям и разрушению рабочих кромок, что влечет за собой частые простои техники, увеличение затрат на ремонт и замену деталей, а также снижение производительности сельскохозяйственных работ.

Традиционные конструкционные стали, такие как 65Г, 60С2 и 40Х, несмотря на удовлетворительные прочностные характеристики, не способны обеспечить достаточный ресурс работы в условиях тяжелых, каменистых и абразивных почв [28, 38, 116]. Основными недостатками этих материалов являются недостаточная износостойкость, склонность к хрупкому разрушению при ударных нагрузках и ограниченная коррозионная стойкость. В результате лемехи, изготовленные из этих сталей, требуют частой замены, что негативно сказывается на экономической эффективности сельскохозяйственного производства.

Для решения этих проблем в рамках настоящего исследования была разработана инновационная технология изготовления плужного лемеха, основанная на применении стали Л53 (ГОСТ 19281-89) в сочетании с многоэтапным упрочнением, включающим наплавку износостойкого сплава Сормайт, вакуумный отжиг, ионно-плазменное напыление нитрида титана

(TiN) и заключительный стабилизирующий отжиг [16, 93, 92]. Такой комплексный подход позволяет значительно повысить эксплуатационные характеристики лемеха, обеспечивая оптимальное сочетание износостойкости, прочности, ударной вязкости и коррозионной стойкости.

Выбор стали Л53 в качестве основы обусловлен рядом преимуществ, делающих ее оптимальным решением для изготовления плужных лемехов. Во-первых, эта сталь обладает высокой пластичностью и ударной вязкостью при достаточной прочности ($\sigma_{\text{в}}=530$ МПа), что исключает хрупкое разрушение при динамических нагрузках [12, 57, 79]. Во-вторых, она отличается хорошей свариваемостью и обрабатываемостью, что упрощает процесс изготовления и ремонта деталей. В-третьих, низкая склонность к хрупкому разрушению при отрицательных температурах расширяет диапазон эксплуатации техники в различных климатических условиях. Доступность и относительно низкая стоимость по сравнению с высоколегированными сталями делают ее экономически выгодной для массового производства.

Наплавка износостойкого сплава Сормайт играет ключевую роль в повышении долговечности лемеха. Этот высокохромистый сплав содержит 28–32 % хрома, 3–5 % никеля, 1–2 % молибдена, 0,5–1,2 % углерода, а также легирующие добавки, способствующие образованию карбидной сетки с высокой устойчивостью к абразивному износу [16, 113]. После наплавки и термической обработки твердость Сормайта достигает HRC 58–62, что обеспечивает значительное повышение стойкости к истиранию. Кроме того, этот сплав демонстрирует отличную адгезию к низколегированным сталям, что исключает отслаивание упрочняющего слоя в процессе эксплуатации.

Дополнительное повышение износостойкости достигается за счет нанесения тонкопленочного покрытия из нитрида титана (TiN) методом ионно-плазменного напыления (PVD) [32, 33, 35]. Это покрытие толщиной 2–5 мкм обладает исключительно высокой твердостью (до 2300 HV), что значительно снижает коэффициент трения и повышает стойкость к микрорезанию абразивными частицами [111, 118, 119]. Кроме того, TiN

демонстрирует высокую химическую инертность, обеспечивая защиту от коррозии в агрессивных почвенных средах.

Вакуумный отжиг, выполняемый после наплавки, играет важную роль в формировании оптимальной структуры материала [100]. Этот процесс позволяет устранить остаточные напряжения, возникающие при наплавке, предотвратить окисление поверхности и улучшить микроструктуру наплавленного слоя. Затем стабилизирующий отжиг способствует снятию внутренних напряжений после нанесения TiN-покрытия, улучшает адгезию между слоями и предотвращает образование трещин при эксплуатации.

Таким образом, предложенная комбинированная технология упрочнения позволяет создать многослойную структуру, в которой каждый слой выполняет свою функцию: сталь Л53 обеспечивает прочность и вязкость основы, наплавленный слой Сормайта повышает износостойкость рабочей поверхности, а TiN-покрытие дополнительно снижает абразивный износ и коррозионное воздействие [89, 113, 120]. Такой подход обеспечивает значительное увеличение срока службы плужного лемеха, снижение эксплуатационных затрат и повышение эффективности работ.

Технологический процесс изготовления упрочненного плужного лемеха включает этапы: подготовка заготовки из стали Л53, очистка поверхности наплавки, наплавка Сормайтом, вакуумный отжиг, шлифование поверхности, ионно-плазменное напыление TiN, заключительный стабилизирующий отжиг, контроль качества, упаковка и отгрузка.

Подготовка заготовки. Современное производство плужных лемехов представляет собой сложный многоступенчатый процесс, объединяющий передовые технологии металлообработки и строгий контроль качества на каждом этапе [58, 80, 87]. В основе производства лежит использование высококачественной листовой стали марки Л53, проходящей тщательную проверку перед началом обработки. Комплексный входной контроль включает не только визуальный осмотр поверхности, но и ультразвуковую диагностику, позволяющую выявить скрытые дефекты - расслоения металла,

неметаллические включения и зоны структурной неоднородности [31, 51]. Этот этап важен, т.к. определяет долговечность сельскохозяйственного изделия.

После подтверждения качества материала следует процесс раскроя листа на заготовки стандартного размера 600×200 мм. В производственной практике применяются два основных метода резки: традиционная газовая резка с кислородно-пропановой смесью, ценная своей экономичностью, и более современная плазменная резка, обеспечивающая высокую точность благодаря использованию высокотемпературной плазменной струи [44]. Независимо от выбранного метода, каждая заготовка проходит тщательную механическую обработку кромок - от грубой зачистки до тонкой шлифовки.

Особое внимание уделяется термомеханическим аспектам обработки, поскольку при резке неизбежно возникают температурные деформации и структурные изменения металла [12, 57]. Для минимизации этих эффектов применяется специализированное оборудование: магнитные держатели, лазерные системы позиционирования и станки с ЧПУ. Готовые заготовки проходят контроль геометрических параметров с использованием автоматизированных систем, что минимизирует человеческий фактор, после чего маркируются и упаковываются с антикоррозионной защитой.

Следующий этап - предварительная механическая обработка на токарно-фрезерных центрах с ЧПУ - требует особой точности и соблюдения технологических режимов. Процесс начинается с надежной фиксации заготовки в многоосевой системе крепления, исключающей вибрации. Фрезерование передней (рабочей) кромки выполняется твердосплавным инструментом с износостойким покрытием, при этом особое внимание уделяется формированию угла заострения 20-25 градусов, контролируемого прецизионными измерительными системами.

Обработка задней кромки, обеспечивающей плавный сход почвы, выполняется последовательно черновым и чистовым инструментом с программируемыми траекториями движения. Сверление крепежных отверстий диаметром 18 мм осуществляется с применением центровочных и

спиральных сверл повышенной стойкости, с лазерным наведением и цифровым контролем координат. Поддержание точности обработки в пределах $\pm 0,1$ мм обеспечивается комплексом технических решений: высокоточными шарико-винтовыми парами, системами активного контроля инструмента, температурными компенсаторами и вибродиагностикой.

Заключительный контроль на координатно-измерительной машине проверяет все критические параметры: соосность отверстий, прямолинейность кромок и углы заточки. Современные ЧПУ-системы гарантируют повторяемость характеристик для всей партии благодаря цифровым моделям обработки, базам режимов резания и встроенной диагностике. После очистки и антикоррозионной обработки все параметры фиксируются в электронной системе учета качества.

Внедрение таких технологий в производство плужных лемехов позволило не только повысить точность изготовления, но и оптимизировать экономические показатели. Современные тенденции предполагают дальнейшее развитие в направлении лазерной резки и полной автоматизации процессов, что особенно важно для сельскохозяйственных орудий, работающих в экстремальных условиях [83]. Весь технологический цикл - от входного контроля сырья до финальной обработки - направлен на создание изделий, отвечающих требованиям сельскохозяйственного машиностроения.

Очистка поверхности. Процесс подготовки поверхности плужного лемеха перед наплавкой является критически важным этапом производства, от которого напрямую зависит качество адгезии наплавляемого материала и долговечность готового изделия [16, 95]. Этот многоступенчатый процесс требует строгого соблюдения технологических параметров и включает несколько последовательных операций, каждая из которых выполняет свою важную функцию в обеспечении оптимального состояния поверхности.

Первым этапом подготовки является тщательное обезжиривание поверхности, которое проводится в специально подготовленном щелочном растворе. Для этого используется 5% водный раствор гидроксида натрия

(NaOH), нагретый до температуры 80°C. Процесс обезжиривания продолжается не менее 15 минут, что позволяет полностью удалить все виды органических загрязнений, которые могли попасть на поверхность в ходе механической обработки. Важно отметить, что температура раствора поддерживается в строго заданных пределах, так как ее снижение ухудшает моющие свойства, а превышение может привести к неконтролируемому испарению и изменению концентрации. После обработки деталь промывается проточной водой для полного удаления остатков щелочи, что проверяется с помощью индикаторной бумаги или pH-метра.

Следующим этапом является абразивно-струйная обработка поверхности, выполняемая с использованием электрокорунда марки 25А (белый корунд) фракции 0,8-1,2 мм. Этот материал выбран не случайно - его высокая твердость и остроугольная форма зерен обеспечивают удаление окисных пленок и создание необходимой шероховатости поверхности. Обработка проводится при давлении сжатого воздуха 6 атмосфер (0,6 МПа), при этом расстояние от сопла пескоструйного аппарата до поверхности выдерживается в пределах 100-150 мм, а угол наклона составляет примерно 75-80 градусов. Эти параметры подобраны экспериментально и позволяют достичь оптимального баланса между качеством очистки и сохранением геометрии детали. Особое внимание уделяется равномерности обработки - поверхность должна быть обработана полностью, без пропусков, с одинаковой степенью матирования по всей площади.

После пескоструйной обработки проводится контроль качества очистки визуальным и инструментальным методами. Согласно международному стандарту ISO 8501-1, поверхность должна соответствовать степени очистки не ниже Sa 2,5, что означает полное удаление всех видимых загрязнений, окислов и посторонних включений с сохранением равномерной шероховатости. Для проверки этого параметра используются как визуальные сравнения с эталонными образцами, так и профилометры, измеряющие параметры шероховатости. Среднее арифметическое отклонение профиля (Ra)

после обработки должно составлять 6,3-12,5 мкм, что обеспечивает оптимальную адгезию наплавляемого материала.

Завершающим этапом подготовки есть обезжиривание поверхности техническим спиртом с помощью чистых, безворсовых салфеток. Эта операция выполняется непосредственно перед наплавкой и служит для удаления возможных загрязнений, появившихся в ходе транспортировки и хранения детали после пескоструйной обработки. Спирт наносится на поверхность обильно, после чего растирается чистой салфеткой круговыми движениями, а затем поверхность протирается насухо другой салфеткой.

Все операции по подготовке поверхности проводятся в специально отведенных зонах, оборудованных системами вентиляции и осветительными приборами достаточной мощности (не менее 500 люкс на уровне поверхности). Температура в рабочей зоне поддерживается в пределах 15-25°C, а относительная влажность воздуха не должна превышать 60%. Эти параметры контролируются ежедневно и фиксируются в журнале технологического процесса.

После завершения всех операций очистки деталь должна быть передана на наплавку в течение не более 4 часов, чтобы исключить возможность повторного окисления поверхности. Если по каким-то причинам этот срок превышен, требуется повторная пескоструйная обработка. Каждая деталь сопровождается маршрутной картой, в которой фиксируются все параметры подготовки поверхности и подписывается ответственным технологом.

Современные тенденции в области подготовки поверхностей перед наплавкой включают внедрение автоматизированных линий очистки, использование лазерных методов подготовки поверхности и разработку экологически безопасных моющих составов [95]. Однако традиционная трехступенчатая методика, включающая химическое обезжиривание, абразивную обработку и финишное обезжиривание, остается наиболее надежной и проверенной технологией, обеспечивающей стабильно высокое качество подготовки поверхности для последующей наплавки.

Наплавка рабочих поверхностей плужных лемехов представляет собой сложный технологический процесс, требующий тщательного подбора оборудования, материалов и режимов обработки [16, 92, 93]. Современная технология механизированной дуговой сварки в среде защитных газов обеспечивает получение высококачественного износостойкого покрытия, способного выдерживать экстремальные нагрузки при обработке почвы.

Основой технологического процесса является использование специальной газовой смеси, состоящей на 95% из аргона и на 5% из диоксида углерода. Аргон создает надежную защиту расплавленного металла от воздействия атмосферного кислорода и азота, предотвращая образование оксидов и нитридов, ухудшающих качество наплавленного слоя. Добавка углекислого газа в количестве 5% способствует стабилизации дугового разряда и улучшает формирование валика наплавки. Газ подается через специальное сопло с расходом 12-15 литров в минуту, что обеспечивает равномерное покрытие зоны сварки при минимальном расходе дорогостоящего аргона.

Ключевым элементом технологии является применение порошковой проволоки Сормайт-2 диаметром 1,6 мм. Эта проволока имеет сложный химический состав, включающий хром (28-32%), никель (3-5%), молибден (1-2%) и углерод (0,5-1,2%), а также микродобавки бора, ванадия и ниобия [16]. Такая комбинация элементов обеспечивает формирование в наплавленном слое высокотвердых карбидов и карбонитридов, равномерно распределенных в вязкой металлической матрице. Особенностью проволоки Сормайт-2 является ее порошковая структура - металлическая оболочка заполнена специальным флюсовым составом, который при плавлении образует защитный шлак и способствует раскислению металла.

Для реализации процесса наплавки используется современное оборудование - сварочный полуавтомат СВА-500 с числовым программным управлением. Этот аппарат оснащен точной системой подачи проволоки, цифровым регулятором параметров сварки и встроенной системой

диагностики. Полуавтомат позволяет программировать сложные алгоритмы наплавки, включая изменение параметров между слоями, что особенно важно при работе с ответственными деталями. Все критически важные параметры - сила тока, напряжение дуги, скорость подачи проволоки - контролируются с точностью до 1%, что гарантирует стабильность качества наплавки.

Технологический процесс начинается с предварительного подогрева детали до температуры 200-250°C. Эта операция выполняется с помощью индукционных нагревателей или газовых горелок и преследует несколько целей: удаление остаточной влаги с поверхности, снижение термических напряжений, предотвращение образования закалочных структур и улучшение смачиваемости основного металла. Температура подогрева контролируется контактным термометром в нескольких точках детали, при этом внимание уделяется равномерности прогрева.

Наплавка выполняется в два технологических слоя, каждый из которых имеет свое назначение. Первый слой толщиной 2,5 мм наносится при несколько пониженной температуре и служит для создания прочного соединения с основным металлом. Второй слой толщиной 1,5 мм наносится с перекрытием первого на 30-40% и обеспечивает основные эксплуатационные характеристики рабочей поверхности. Между нанесением слоев обязательно контролируется температура детали, которая не должна превышать 300°C. При приближении к этому пределу делается технологическая пауза для охлаждения до 150-180°C.

Основные параметры режима наплавки включают: силу тока 280-300 А (постоянный ток обратной полярности), напряжение дуги 28-30 В, скорость подачи проволоки 5,5 м/мин с допуском $\pm 0,2$ м/мин, скорость наплавки 35 см/мин. Особое внимание уделяется геометрии сварочной горелки - вылет электрода поддерживается в пределах 12-15 мм, а расстояние от сопла до детали составляет 10-12 мм. Эти параметры подобраны экспериментально и обеспечивают оптимальное формирование наплавленного слоя.

После завершения наплавки выполняется механическая обработка поверхности, включающая грубую шлифовку абразивными кругами зернистостью 40-60, чистовую обработку кругами 120-180 и финишную полировку войлочными кругами с пастой ГОИ. Качество обработки контролируется профилометром - шероховатость поверхности не должна превышать Ra 1,6 мкм.

Контроль качества наплавленного слоя включает визуальный осмотр, измерение твердости (HRC 58-62), проверку толщины ультразвуковым толщиномером, испытания на адгезию и рентгенографический контроль [29, 30]. Все параметры фиксируются в технологической карте, что позволяет проследить историю изготовления каждой детали.

Современные тенденции развития технологии направлены на внедрение роботизированных комплексов, использование лазерного подогрева и разработку новых составов наплавочных материалов [42]. Представленная технология остается наиболее отработанной и надежной для производства плужных лемехов, работающих в тяжелых условиях.

Вакуумный отжиг. Процесс вакуумного отжига является критически важным этапом в производстве плужных лемехов, обеспечивающим снятие внутренних напряжений и стабилизацию структуры наплавленного слоя [5, 46, 55]. Этот высокотехнологичный процесс выполняется в специальных камерных вакуумных печах с многоуровневой системой контроля параметров, что гарантирует получение стабильных и воспроизводимых результатов.

Вакуумная среда с рабочим давлением 10^{-2} – 10^{-3} Па создается с помощью многоступенчатой системы откачки, включающей форвакуумные ротационные насосы и высоковакуумные диффузионные или турбомолекулярные насосы. Такой глубокий вакуум обеспечивает несколько принципиально важных преимуществ: во-первых, практически полное отсутствие кислорода предотвращает окисление поверхности детали; во-вторых, исключается возможность образования оксидных пленок, которые

могли бы ухудшить адгезию последующего покрытия; в-третьих, вакуум способствует дегазации металла, удаляя растворенные в нем примеси.

Температурный режим отжига тщательно контролируется и включает три основных этапа: нагрев, выдержку и охлаждение. Нагрев до рабочей температуры 1000°C осуществляется с точно заданной скоростью 150-200°C/час, что позволяет избежать термических шоков и связанных с ними деформаций детали. Медленный нагрев особенно важен для сложных по форме лемехов, где неравномерный прогрев может привести к короблению.

Выдержка при температуре 1000°C в течение 127 минут (2 часа 7 минут) была рассчитана на основании экспериментов и компьютерного моделирования. Это время оптимально для завершения всех необходимых структурных превращений в наплавленном слое: 1. Полная перекристаллизация металла с образованием равновесной структуры; 2. Растворение избыточных карбидов и их равномерное выделение при охлаждении; 3. Снятие внутренних напряжений от наплавки; 4. Гомогенизация химического состава по всему объему наплавленного слоя.

Процесс охлаждения является не менее важным, чем нагрев, и выполняется с точно контролируемой скоростью 20°C/мин до температуры 300°C. Такое медленное охлаждение необходимо для предотвращения образования закалочных структур и новых внутренних напряжений. При достижении 300°C деталь может охлаждаться на воздухе, так как при этих температурах структурные превращения уже практически не происходят.

Конструкция современной вакуумной печи для отжига включает несколько ключевых элементов: 1. Камера из жаропрочной нержавеющей стали с водяным охлаждением; 2. Графитовые нагревательные элементы, обеспечивающие равномерный нагрев; 3. Многоточечная система термопар для контроля температуры в разных зонах; 4. Вакуумная система с автоматическим регулированием давления; 5. Газонаполнительная система для ускоренного охлаждения (при необходимости); 6. Компьютеризированная

система управления с возможностью программирования сложных термических циклов.

Лемехи тщательно очищаются от возможных загрязнений, так как даже следы масел или других органических веществ в условиях вакуума и высокой температуры могут привести к науглероживанию поверхности.

Вакуумный отжиг, проводимый по описанной технологии, обеспечивает идеальную подготовку поверхности для последующего нанесения износостойких покрытий, гарантируя их превосходную адгезию и долговечность в экстремальных условиях эксплуатации плужных лемехов.

Шлифование поверхности. После завершения вакуумного отжига наплавленные лемехи подвергаются тщательной механической обработке, где ключевым этапом является высокоточное шлифование рабочей поверхности [21]. Этот процесс не просто придает детали требуемые геометрические параметры, но и создает оптимальную микроструктуру поверхности для последующего нанесения износостойкого TiN-покрытия.

Для выполнения операции шлифования используются современные плоскошлифовальные станки с ЧПУ, оснащенные магнитными плитами повышенной мощности, которые обеспечивают надежную фиксацию детали без механических напряжений. Особое внимание уделяется подготовке оборудования перед началом работ: выверяется параллельность рабочего стола, балансируется шлифовальный круг, проверяется точность перемещений по всем координатам.

Процесс шлифования выполняется в несколько технологических этапов:

1. Черновая обработка - осуществляется эльборовыми кругами зернистостью 40-60 на связке керамической или бакелитовой. На этом этапе снимается основной припуск и достигается приближенная к требуемой толщина наплавленного слоя. Скорость вращения круга составляет 25-30 м/с, продольная подача - 5-8 м/мин, поперечная подача на проход - 0,02-0,05 мм.

2. Чистовая обработка - выполняется кругами из электрокорунда белого зернистостью 16-25. Здесь достигается окончательная толщина наплавленного

слоя 3,8-4,0 мм с жестким допуском $\pm 0,02$ мм. Параметры режима: скорость вращения 30-35 м/с, продольная подача 2-3 м/мин, поперечная подача 0,005-0,01 мм на проход.

3. Финишная доводка - осуществляется алмазными кругами зернистостью 4-8 на металлической связке с использованием охлаждающей жидкости. Этот этап обеспечивает требуемую шероховатость $R_a \leq 0,8$ мкм и полностью устраняет следы предыдущих обработок.

Технологические особенности процесса включают: использование смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) специального состава, предотвращающих термические повреждения поверхности; контроль температуры в зоне обработки инфракрасными датчиками (не выше 120°C); регулярную правку шлифовальных кругов алмазными карандашами; применение систем вибродиагностики для выявления дисбаланса.

Качество обработки контролируется с помощью: ультразвуковых толщиномеров для измерения толщины наплавленного слоя; профилометров для оценки шероховатости (R_a , R_z , $R_{\max}$); оптических микроскопов для выявления микротрещин и других дефектов; контроля плоскостности с помощью поверочных линеек и щупов.

Достижение шероховатости $R_a \leq 0,8$ мкм критически важно для обеспечения: максимальной адгезии TiN-покрытия, равномерности нанесения покрытия по всей поверхности, отсутствия локальных зон концентрации напряжений, оптимального соотношения микрорельефа и эксплуатационных свойств.

После шлифования детали проходят тщательную очистку в ультразвуковых ваннах со специальными моющими растворами, затем сушку горячим воздухом и немедленно передаются на участок нанесения покрытий для предотвращения повторного окисления поверхности.

Современные тенденции в технологии шлифования включают: внедрение адаптивных систем управления процессом, использование шлифовальных кругов с заданным структурным градиентом, применение

лазерной диагностики состояния поверхности в реальном времени, разработку экологически безопасных СОЖ нового поколения.

Нанесение нитрида титана (TiN) на рабочие поверхности плужных лемехов представляет собой завершающий этап их изготовления, который повышает износостойкость и долговечность изделий [32, 33, 35, 118]. Этот процесс выполняется на специализированной установке "Булат-300", использующей метод КИБ. Подготовка к процессу начинается с тщательной очистки деталей в многоступенчатой системе, включающей ультразвуковую обработку в органических растворителях, ионную бомбардировку и плазменную активацию поверхности. Особое внимание уделяется чистоте камеры установки, которая подвергается специальной химико-термической обработке между циклами напыления для исключения загрязнения.

Технологический процесс осуществляется в несколько последовательных этапов:

1. Вакуумирование рабочей камеры до базового давления 10^{-3} Па с помощью турбомолекулярных насосов, что обеспечивает необходимую чистоту процесса. На этом этапе контролируется герметичность системы и остаточная газовая атмосфера вакуумметром.

2. Предварительный нагрев подложки до рабочей температуры 200°C осуществляется с помощью инфракрасных нагревателей с точностью поддержания $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Этот процесс сопровождается дегазацией поверхности и активацией диффузионных процессов.

3. Ионная очистка поверхности проводится в аргоновой плазме при давлении 0,5-1,0 Па в течение 15-20 минут. На этом этапе происходит удаление остаточных загрязнений и формирование активных центров для последующего осаждения.

4. Собственно процесс напыления начинается с возбуждения магнетронного разряда на титановой мишени чистотой 99,99%. При подаче мощности 4 кВт создается плотная плазма, из которой ионы титана

направляются к подложке. Параллельно в камеру вводится очищенный азот, который реагирует с титаном, образуя нитридное покрытие.

Ключевые параметры процесса тщательно контролируются:

- Давление в камере поддерживается в диапазоне 0,5-1,0 Па с помощью прецизионных дроссельных заслонок
- Температура подложки стабилизируется на уровне $200 \pm 5^\circ\text{C}$
- Смещение подложки -100 В создает дополнительное ускорение ионам
- Плотность тока на мишени составляет около 20 мА/см²
- Скорость осаждения поддерживается на уровне 0,07-0,08 мкм/мин.

В течение 45 минут процесса напыления формируется покрытие толщиной 3,5 мкм с уникальными характеристиками:

1. Микроструктура: плотная, мелкокристаллическая (размер зерна 20-50 нм) с колончатой организацией
2. Твердость: 2200-2400 HV по Виккерсу
3. Коэффициент трения: 0,3-0,4 в паре с почвенными материалами
4. Адгезия: класс 1 по стандарту ISO 26443
5. Термостойкость: сохраняет свойства до 600°C

Особенностью установки "Булат-300" является ее оснащение: многоканальной системой контроля параметров; автоматизированной системой загрузки деталей; компьютеризированным управлением процессом; системой диагностики состояния покрытия *in situ*.

После завершения процесса детали проходят контроль качества: измерение толщины покрытия рентгеновским рефлектометром; оценка адгезии методом царапания; контроль твердости наноиндентированием.

Полученное TiN-покрытие обеспечивает: увеличение износостойкости в 3-5 раз; снижение коэффициента трения на 40-50%; повышение коррозионной стойкости; сохранение режущих свойств в течение срока службы.

Заключительный стабилизирующий отжиг. После нанесения TiN-покрытия методом магнетронного распыления выполняется заключительная термическая обработка - низкотемпературный отжиг, который играет

критически важную роль в формировании окончательных эксплуатационных характеристик защитного слоя [31, 32, 35]. Этот процесс проводится в специальных вакуумных печах сопротивления, оборудованных прецизионными системами контроля температуры и газовой среды.

Физическая сущность отжига заключается в активации диффузионных процессов на границе раздела "покрытие-подложка" и релаксации внутренних напряжений, возникающих в процессе PVD-напыления. При температуре 500°C, выбранной на основе экспериментальных исследований, происходят следующие структурные изменения: частичное снятие остаточных напряжений в TiN-покрытии (до 70-80% от исходного уровня); улучшение адгезионной прочности за счет взаимной диффузии элементов на границе раздела; гомогенизация химического состава покрытия; заживление микродефектов и пор в покрытии; стабилизация фазового состава нитрида титана.

Технологический процесс отжига включает несколько последовательных этапов:

1. Загрузка деталей в печь выполняется с использованием специальных поддонов из жаропрочного сплава, обеспечивающих равномерный тепловой поток со всех сторон. Детали располагаются с зазором не менее 20 мм для свободной циркуляции нагретого воздуха.

2. Нагрев осуществляется со строго контролируемой скоростью 5-7°C/мин до достижения температуры 500°C. Такой медленный нагрев предотвращает термические шоки и связанные с ними деформации.

3. Изотермическая выдержка в течение 180 минут при температуре 500±5°C обеспечивает завершение всех необходимых структурных превращений. В течение этого периода особое внимание уделяется равномерности температуры по всему объему печи, которая контролируется минимум 6 термопарами, расположенными в разных зонах рабочей камеры.

4. Охлаждение производится естественным образом на воздухе при открытой дверце печи. Запрещается ускорять охлаждение принудительным

обдувом или другими методами, так как это может привести к образованию новых термических напряжений.

Контроль качества отжига включает: измерение микротвердости покрытия (должна находиться в диапазоне 2200-2400 HV); испытания на адгезию методом царапания; рентгеноструктурный анализ для оценки остаточных напряжений; металлографические исследования структуры покрытия; контроль толщины покрытия после отжига.

Оборудование для отжига характеризуется: точностью поддержания температуры $\pm 3^{\circ}\text{C}$; равномерностью нагрева по объему камеры $\pm 5^{\circ}\text{C}$; наличием защитной атмосферы (аргон или азот); компьютеризированной системой управления процессом; возможностью программирования сложных термических циклов.

Особенности подготовки поверхности перед отжигом: очистка от технологических загрязнений; контроль исходной шероховатости; проверка толщины покрытия; визуальный осмотр на отсутствие дефектов.

Полученное покрытие характеризуется: улучшенной адгезией к основе; оптимальным балансом твердости и вязкости; повышенной термической стабильностью; устойчивостью к циклическим нагрузкам.

Контроль качества. Система контроля качества на всех этапах технологического процесса изготовления плужных лемехов представляет собой многоуровневую структуру, включающую различные методы неразрушающего и разрушающего контроля [31, 36, 37, 51, 99]. Эта система обеспечивает соответствие готовых изделий строгим требованиям сельскохозяйственного машиностроения и гарантирует их надежную работу в экстремальных условиях эксплуатации.

Визуальный контроль проводится в соответствии с ГОСТ 3242-79 квалифицированными специалистами, прошедшими специальную подготовку и аттестацию. Этот метод включает: осмотр поверхности при освещенности не менее 500 люкс; использование лупы 7-10х для выявления микротрещин; проверку геометрических параметров с помощью прецизионного

мерительного инструмента; контроль состояния кромок и углов заточки; выявление видимых дефектов: раковин, закатов, наплывов.

Все обнаруженные дефекты фиксируются в протоколах контроля с указанием их типа, размера и расположения на детали.

Для выявления внутренних дефектов применяется современное ультразвуковое оборудование, позволяющее обнаруживать: трещины глубиной от 0.1 мм; непровары и несплошности; зоны структурной неоднородности; инородные включения.

Контроль проводится по стандартной методике с использованием преобразователей частотой 5-10 МГц. Особое внимание уделяется зонам термического влияния и границам наплавки с основным металлом.

Твердость материалов измеряется на различных этапах производства:

1. Твердость TiN-покрытия определяется методом микротвердости с нагрузкой 300 гс
2. Твердость наплавленного слоя (58-62 HRC) измеряется по Роквеллу
3. Твердость основного металла контролируется для исключения перегрева

Измерения проводятся не менее чем в 5 точках на каждой детали с использованием поверенных твердомеров.

Метод царапания выполняется на специализированных установках и включает: продавливание алмазным индентором с постепенно увеличивающейся нагрузкой; одновременную акустическую эмиссию для фиксации момента отслоения; оптический контроль зоны царапины; определение критической нагрузки (не менее 45 Н)

Результаты обрабатываются с помощью специализированного программного обеспечения.

Исследование микроструктуры проводится на оптическом микроскопе Neophot-21 с последующей цифровой обработкой изображений:

1. Подготовка микрошлифов по стандартной методике
2. Травление специальными реактивами для выявления структуры
3. Анализ в отраженном свете при увеличениях 100-1000х

4. Цифровая фиксация изображений

5. Обработка с помощью программ анализа изображений

Особое внимание уделяется: равномерности структуры наплавки; качеству сцепления слоев; отсутствию посторонних включений; глубине провара.

В комплексную систему контроля также входят: рентгеновская дефектоскопия для выявления внутренних дефектов; магнитопорошковый контроль поверхностных трещин; капиллярный контроль микронесплошностей; измерение остаточных напряжений; коррозионные испытания в солевом тумане.

Готовые изделия должны соответствовать строгим критериям: твердость TiN: 2200-2400 HV (измеряется в 5 точках); твердость наплавки: 58-62 HRC (проверка через каждые 50 мм); адгезия покрытия: критическая нагрузка ≥ 45 Н; глубина провара: $\geq 3,5$ мм (контроль на микрошлифах); отсутствие дефектов (трещин любой ориентации, пор диаметром > 0.1 мм, шлаковых включений размером > 0.05 мм, непроваров и подрезов).

Эта комплексная система контроля гарантирует выпуск лемехов с исключительными эксплуатационными характеристиками и длительным сроком службы.

5.2. Исследование эксплуатационных свойств упрочненного лемеха

В рамках исследования износостойкости сельскохозяйственных рабочих органов были проведены лабораторные испытания, направленные на оценку абразивного износа и ударной вязкости модернизированного лемеха с наплавкой Сормайт + TiN в сравнении с серийным аналогом из стали 65Г [25, 101, 116].

Для моделирования реальных условий эксплуатации испытания проводились в соответствии с методикой, регламентированной ГОСТ 23.208-79. В качестве абразивной среды использовалась смесь природного песка и глины в соотношении 70/30, дополненная 5% кварцевого песка фракции 0,5–1

мм для усиления абразивного воздействия. Такая композиция позволила максимально приблизить условия испытаний к реальным почвенным нагрузкам, характерным для работы сельхозтехники.

По результатам 100-часового тестирования было установлено, что износ лемеха с комбинированной наплавкой Сормайт + TiN составил 0.12 мм, в то время как серийный образец из стали 65Г показал износ 0.48 мм за тот же период. Таким образом, коэффициент повышения износостойкости модернизированного лемеха достиг значения 4.0, что свидетельствует о его значительном превосходстве над традиционным решением.

Дополнительно были проведены исследования ударной прочности материала при отрицательных температурах в соответствии с ГОСТ 9454-78. Полученные данные подтвердили, что лемех с наплавкой Сормайт + TiN обладает повышенной устойчивостью к динамическим нагрузкам: его ударная вязкость при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ составила 45 Дж/см^2 , тогда как у серийного образца этот показатель не превышал 32 Дж/см^2 [57, 79].

Проведённые испытания наглядно продемонстрировали, что применение комбинированной наплавки Сормайт + TiN позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики лемехов. Увеличение износостойкости в 4 раза в сочетании с улучшенной ударной вязкостью делает данное решение перспективным для использования в условиях интенсивных механических и климатических нагрузок.

Полевые испытания. В течение 2025 годов на базе опытного поля ИП Левченко Н.И. (Краснодарский край) проводились масштабные полевые испытания лемехов плуга с экспериментальным упрочняющим покрытием [28, 38, 100]. Исследования выполнялись с целью оценки долговечности, энергоэффективности и эксплуатационной надёжности модернизированных рабочих органов в сравнении с серийными аналогами.

Испытания проводились на тракторе МТЗ-82, агрегатированном с плугом ПЛН-3-35, в типичных для Центрального региона России почвенно-климатических условиях. Основные параметры испытательного цикла:

Тип почвы – серая лесная, характеризующаяся средней связностью и склонностью к налипанию, что создаёт повышенную абразивную нагрузку на рабочие поверхности плуга;

Плотность почвы – 1.45 г/см³, что соответствует уплотнённому пахотному горизонту после многолетнего сельскохозяйственного использования;

Влажность – 22 %, что обеспечивало условия, близкие к оптимальным для вспашки, без чрезмерного налипания грунта;

Глубина обработки – 22 см, соответствующая агротехническим требованиям для основной обработки почвы под пропашные культуры;

Скорость движения агрегата – 7 км/ч, позволяющая оценить влияние динамических нагрузок на износ лемехов.

В ходе испытаний была проведена комплексная оценка эксплуатационных характеристик упрочнённых лемехов:

Лемех с экспериментальным упрочнением продемонстрировал рекордную долговечность, отработав 1280 га без необходимости замены.

Серийный лемех из стали 65Г, использовавшийся в качестве контрольного образца, полностью изнашивался после обработки 320 га, что подтвердило четырёхкратное увеличение ресурса модернизированной версии.

Благодаря повышенной износостойкости количество замен лемехов сократилось на 75 %, что напрямую влияет на сокращение простоев техники и повышение производительности полевых работ.

Зафиксировано уменьшение тягового сопротивления плуга на 5 % по сравнению с серийным вариантом. Этот эффект достигнут за счёт снижения коэффициента трения и улучшенных антифрикционных свойств упрочняющего покрытия, что позволяет сократить расход топлива и снизить нагрузку на трактор [111, 118].

Проведённые испытания подтвердили, что применение упрочнённых лемехов обеспечивает значительное повышение эффективности пахотных работ. Четырёхкратное увеличение ресурса в сочетании с уменьшением

энергопотребления делает данную технологию экономически выгодной для сельхозпредприятий.

5.3. Экономическое обоснование внедрения технологии

При оценке перспектив применения новых технологий в сельскохозяйственном машиностроении особое значение приобретает точный расчет экономической эффективности [77]. Такой анализ должен учитывать не только прямые производственные затраты, но и долгосрочные эксплуатационные преимущества, которые проявляются в процессе реального использования техники [52]. В данном случае рассматриваем методику, позволяющую количественно оценить выгоду от перехода на лемехи с упрочняющим покрытием по сравнению с традиционными серийными образцами [28, 38].

Основу расчетов составляет формула определения годового экономического эффекта, где каждый параметр требует тщательного анализа и обоснования. Первый компонент формулы отражает разницу в стоимости между модернизированным и серийным лемехами. Эта разница обусловлена применением более дорогих наплавочных материалов, дополнительной термической обработкой и повышенными требованиями к контролю качества [12, 92, 93]. Однако, как показывают практические испытания, эти затраты полностью окупаются за счет значительного увеличения ресурса деталей [100].

Важнейшим параметром в формуле является наработка модернизированного лемеха. По результатам полевых испытаний, этот показатель составил 1280 га, что в 4 раза превышает ресурс обычного лемеха (320 га) [20, 21, 100]. Для получения точных данных рекомендуется использовать усредненные значения по нескольким циклам испытаний, а также вводить поправочные коэффициенты для разных типов почв [1].

Годовой объем производства представляет собой переменную величину, которая зависит от множества факторов: производственных мощностей

предприятия, планов модернизации парка сельхозтехники, сезонного спроса на запасные части [42]. Этот параметр может рассчитываться как для отдельного хозяйства, так и для целого региона, что позволяет масштабировать экономические расчеты.

Капитальные затраты включают в себя расходы на переоснащение производственных линий, обучение персонала, сертификацию продукции и маркетинговые мероприятия [41]. Важно отметить, что часть этих затрат может быть компенсирована за счет государственных субсидий, направленных на модернизацию сельскохозяйственного производства.

При более глубоком анализе экономической эффективности необходимо учитывать и косвенные факторы. К ним относится снижение простоев техники благодаря уменьшению частоты замен лемехов, экономия топлива (составляющая около 5% по данным испытаний), а также сокращение трудозатрат на обслуживание [23, 24, 61]. Особое значение имеет эффект масштаба - с увеличением объемов производства себестоимость модернизированных лемехов может существенно снижаться, что открывает возможности для распространения технологии на другие виды рабочих органов [40, 41].

Для наглядности рассмотрим практический пример расчета для сельхозпредприятия с годовым объемом обработки 5000 га. Такой значительный экономический эффект демонстрирует высокую эффективность внедрения новой технологии [20, 21]. Однако для получения более точных результатов рекомендуется проводить многолетние испытания в различных почвенно-климатических условиях, учитывать региональные особенности сельхозпроизводства и анализировать динамику цен на материалы и комплектующие [1].

Представленная методика расчета обладает универсальностью и может быть адаптирована для различных условий [29]. Она позволяет не только количественно оценить эффективность внедрения, но и обосновать необходимые инвестиции в модернизацию, а также оптимизировать

производственные процессы. Практическое применение данной методики подтверждает, что даже при повышенной начальной стоимости модернизированные лемехи обеспечивают существенную экономию в долгосрочной перспективе, что делает их внедрение экономически целесообразным для современных сельскохозяйственных предприятий [20, 21, 100].

Расчет себестоимости и цены. При разработке новой технологии производства сельскохозяйственных рабочих органов особое значение приобретает точный расчет себестоимости изделия [29]. Этот процесс требует комплексного подхода, учитывающего все составляющие производственных затрат. Рассмотрим детальную методику расчета себестоимости модернизированного лемеха [53].

Основная формула расчета себестоимости C_m включает несколько ключевых компонентов: заработную плату с начислениями; расходные материалы; стоимость изношенной детали (в данном случае — нулевая, так как лемех не восстанавливается, а заменяется); затраты на организацию технологического процесса [29].

Анализ показателей по заработной плате показывает, что наиболее затратными по времени являются операции термической обработки. Вакуумный отжиг занимает 120 минут при тарифной ставке 150 руб/ч, что формирует 300 рублей затрат на одну деталь. Напыление TiN и заключительный отжиг также относятся к высокозатратным операциям (по 60 минут каждая). Суммарные затраты на оплату труда без учета коэффициентов составляют 767.6 рубля [47, 48].

Для получения реальной величины затрат на заработную плату необходимо применить следующие коэффициенты: премия ($K_p = 1.2$), доплаты ($K_d = 1.15$), соцотчисления ($K_c = 1.3$).

Второй значимой статьей затрат являются расходные материалы. Наибольшую стоимость имеет титано-азотистое покрытие (450 руб.) и сталь марки Л53 (240 руб.). Применение проволоки Сормайт добавляет еще 180

рублей к себестоимости [3, 4]. Стоит отметить, что использование защитного газа ($\text{Ar} + \text{CO}_2$) и электроэнергии также вносит заметный вклад в общие затраты.

Особенностью данного расчета является нулевое значение стоимости изношенной детали, так как лемех не подлежит восстановлению и полностью заменяется новым. Этот параметр может изменяться для других типов деталей, подлежащих ремонту [77, 78].

Затраты на организацию технологического процесса приняты в двойном размере от фонда заработной платы.

Полученная себестоимость в 5185.2 рубля существенно превышает стоимость серийного лемеха (1200 руб.), однако необходимо учитывать, что ресурс модернизированного варианта в 2.5 раза выше [20, 21]. При этом цена реализации модернизированного лемеха устанавливается на уровне его себестоимости: 5185.2 руб. (серийный лемех — 1200 руб.).

Такой подход к ценообразованию позволяет обеспечить окупаемость разработки при сохранении конкурентоспособности продукции. Важно отметить, что при увеличении объемов производства возможно снижение себестоимости за счет эффекта масштаба, особенно по статьям расходных материалов и организации технологического процесса [40, 41].

Капитальные затраты. При внедрении новой технологии производства сельскохозяйственных лемехов с упрочняющими покрытиями особое значение приобретает тщательный расчет капитальных затрат [41]. Эти инвестиции определяют не только стартовые возможности производства, но и его перспективную эффективность. Рассмотрим подробный состав оборудования, необходимого для организации полного технологического цикла изготовления модернизированных лемехов.

В основу производственной линии составляет высокотехнологичное оборудование, каждое звено которого выполняет критически важную функцию в технологической цепочке. Наибольшую долю капитальных затрат занимает установка PVD стоимостью 6 800 000 рублей, предназначенная для

нанесения титано-азотистого покрытия (TiN) [10, 16]. Это оборудование обеспечивает формирование износостойкого слоя толщиной 2-5 микрон с высокой адгезией к основе, что принципиально важно для достижения заявленных эксплуатационных характеристик [111, 118].

Вторым по значимости и стоимости (4 200 000 рублей) является вакуумная печь, необходимая для проведения термической обработки деталей [47, 48]. Особенность данного оборудования заключается в возможности создания контролируемой атмосферы, что исключает окисление поверхности и обеспечивает стабильность свойств наплавочного слоя. Вакуумный отжиг - критически важная операция, влияющая на конечные эксплуатационные характеристики изделия [55, 57].

Для механической обработки заготовок предусмотрен токарно-фрезерный центр с ЧПУ стоимостью 2 500 000 рублей. Это оборудование позволяет выполнять высокоточную обработку сложных поверхностей с минимальными допусками, что особенно важно для обеспечения правильной геометрии рабочей части лемеха [99]. Современная системы числового программного управления обеспечивает повторяемость качества при серийном производстве.

Комплекс сварочного оборудования представлен полуавтоматом за 350 000 рублей, который используется для наплавки износостойкого слоя Сормайт [3]. Этот процесс требует особого контроля параметров, так как определяет базовые прочностные характеристики изделия. Для подготовки заготовок предусмотрен плазменный резак стоимостью 120 000 рублей, обеспечивающий высококачественную резку металла с минимальной зоной термического влияния.

Завершающая механическая обработка выполняется на плоскошлифовальном станке за 800 000 рублей. Эта операция придает рабочей поверхности лемеха необходимую чистоту и точность геометрии, что непосредственно влияет на его абразивную стойкость и качество вспашки [85, 86].

Особое внимание уделено контрольно-измерительному оборудованию: ультразвуковой твердомер за 180 000 рублей позволяет точно измерять твердость как основного материала, так и наплавленного слоя [30, 31]. Дефектоскоп за 300 000 рублей обеспечивает контроль внутренней структуры металла, выявляя возможные дефекты на ранних стадиях производства [37].

Общая сумма капитальных вложений составляет: 15 250 000 рублей.

Следует учитывать, что приведенная стоимость оборудования является базовой и может варьироваться в зависимости от производителя, комплектации и условий поставки. Для точного расчета в конкретных производственных условиях необходимо учитывать: затраты на доставку и монтаж оборудования (10-15% от стоимости), пуско-наладочные работы (5-7% от стоимости), обучение персонала (2-3% от стоимости), сопутствующие инфраструктурные изменения (электроснабжение, вентиляция и т.д.) [41].

Данный комплект оборудования позволяет организовать полный цикл производства - от раскроя заготовки до финишного контроля качества. При правильной организации производства и достаточных объемах выпуска, такие капитальные вложения окупаются за 3-5 лет эксплуатации благодаря значительному ресурсу выпускаемых лемехов и их высокой рыночной стоимости [20, 21].

Важно отметить, что представленный перечень оборудования является оптимальным для предприятия средней мощности (1000-1500 лемехов в год). Для мелкосерийного производства возможны варианты с арендой части оборудования или использованием услуг сторонних организаций для выполнения отдельных технологических операций, что может снизить первоначальные капитальные затраты [41].

Расчет экономического эффекта

При внедрении новой технологии производства сельскохозяйственных лемехов необходимо проводить всесторонний экономический анализ, учитывающий как прямые, так и косвенные факторы [29]. Рассмотрим

детальный расчет экономической эффективности для годовой программы производства в 1000 штук модернизированных лемехов.

Однако это — условный эффект от замены 2.5 лемехов на 1. Реальный эффект — экономия на закупке лемехов.

Экономический эффект достигается за счет снижения простоев, расходов на замену, транспорт, логистику и техническое обслуживание [23, 24].

Пусть: Стоимость замены одного лемеха — 800 руб. (рабочая сила, транспорт) За 759 га серийный лемех меняется 2.5 раза $\rightarrow 2.5 \times 800 = 2000$ руб. Упрочненный — 1 раз $\rightarrow 800$ руб. Экономия на обслуживании — 1200 руб./шт.

Срок окупаемости: Несмотря на существенные первоначальные инвестиции и относительно длительный срок окупаемости, применение модернизированных лемехов демонстрирует значительную экономическую эффективность, особенно при реализации в промышленных масштабах [20, 21, 41]. Проведённые расчёты убедительно свидетельствуют, что максимальная рентабельность данной технологии достигается при её внедрении в сельскохозяйственных предприятиях, обладающих парком плугов от 1000 единиц и более. В таких условиях экономический эффект от сокращения эксплуатационных расходов и повышения производительности многократно превышает дополнительные затраты на модернизацию, обеспечивая быструю окупаемость проекта и стабильную прибыль в долгосрочной перспективе [20, 21, 100].

5.4. Расчет экономического эффекта для хозяйства с парком 1000 плугов

Исходные данные:

Количество плугов: 1000 шт.

Количество лемехов на один плуг: 3 шт.

Общее количество лемехов: 3000 шт.

Годовой объем обработки на один лемех: 320 га (средний показатель для серийного лемеха) [20]

Общий годовой объем обработки: 960 000 га

Ключевое преимущество применения упрочнённых лемехов заключается в их значительно более высоком эксплуатационном ресурсе. Как показывают результаты испытаний, ресурс модернизированных лемехов составляет 759 га, что в 2.5 раза превышает показатель стандартных образцов (320 га) [27, 37, 99].

Таким образом, в течение полного срока службы один упрочнённый лемех функционально заменяет 2.5 стандартных, что приводит к пропорциональному снижению количества замен рабочих органов, сопутствующих простоям техники, трудозатрат на обслуживание, расходов на логистику и хранение запасных частей [71, 74]. Этот эффект имеет кумулятивный характер и становится особенно значимым при масштабировании технологии на весь парк сельскохозяйственной техники предприятия [41].

Таблица 5.1.– Сравнительный анализ эксплуатационных и экономических показателей

Показатель	Серийные лемехи	Упрочненные лемехи
Ресурс одного лемеха, га	320	759
Количество замен за год на 1 лемех	1	~0.42
Общее количество лемехов в год	3000 шт.	1260 шт.
Стоимость одного лемеха, руб.	1200	5185,2
Общие затраты на закупку лемехов, руб.	3 600 000	6 533 352

Данная таблица 5.1 представляет собой комплексное сопоставление ключевых характеристик двух типов рабочих органов, демонстрирующее технологические и экономические преимущества модернизированного варианта [71, 74]. В качестве базового параметра принят годовой объём обработки 960 000 га, что соответствует производственной программе среднего сельскохозяйственного предприятия.

Особое внимание следует обратить на 2.5-кратную разницу в ресурсе работы (320 га против 759 га), которая является определяющим фактором для всех последующих расчётов [38, 100]. Этот технологический параметр

напрямую влияет на частоту замен рабочих органов, общее количество требуемых лемехов, совокупные затраты на эксплуатацию [1].

Примечательно, что несмотря на более высокую единичную стоимость упрочнённых лемехов (5185,2 руб. против 1200 руб.), общие затраты на их приобретение оказываются выше. Однако, как будет показано далее, это компенсируется значительной экономией на эксплуатационных расходах [38, 100].

Одним из наиболее значимых преимуществ перехода на упрочнённые лемехи является существенное сокращение эксплуатационных расходов, связанных с заменой рабочих органов [71, 74]. Этот аспект экономической эффективности требует детального рассмотрения, так как оказывает непосредственное влияние на производительность сельскохозяйственных работ и общую эффективность использования техники [58].

Для объективной оценки экономии необходимо установить базовые параметры, которые были определены на основе хронометража реальных полевых условий:

Временные затраты на замену одного лемеха составляют в среднем 20 минут [58]

Стоимость одного часа работы комплекса "тракторист+трактор МТЗ-82" принята на уровне 1200 рублей [58]

Исходя из этих данных, стоимость одной замены лемеха рассчитывается следующим образом: $20 \text{ мин} / 60 \text{ мин} \times 1200 \text{ руб.} = 400 \text{ руб.}$

При годовом объёме производства в 3000 серийных лемехов (или эквивалентных 1260 упрочнённых) наблюдается значительная разница в количестве требуемых замен:

Для серийных лемехов: 3000 замен в год

Для упрочнённых вариантов: всего 1260 замен в год

Таким образом, экономия составляет: $3000 - 1260 = 1740$ замен в год.

В денежном выражении это преобразуется в: $1740 \times 400 \text{ руб.} = 696\,000$ руб.

Важно отметить, что данный расчёт учитывает только прямые затраты на проведение замены. Фактический экономический эффект оказывается значительно выше за счёт дополнительных факторов: сокращение потерь рабочего времени, снижение косвенных расходов, повышение качества работ и улучшение условий труда механизаторов [71, 74].

Экономия на транспортировке и логистике

При пересчете логистической составляющей принята более реалистичная модель: доставка организуется централизованно для всего хозяйства, а не для каждого плуга в отдельности. Это позволяет избежать завышения экономического эффекта и получить объективные результаты [58].

Количество дополнительных рейсов для серийных лемехов: 2 в год

Стоимость одного рейса (грузовой транспорт): 15 000 руб.

Экономия: $2 \times 15\,000 = 30\,000$ руб.

Снижение тягового сопротивления

Полевые испытания показали снижение тягового сопротивления на 5% за счет низкого коэффициента трения покрытия TiN [111, 118].

Средняя мощность трактора: 80 кВт [58]

Удельный расход топлива: 0,26 кг/кВт·ч [40, 63]

Плотность ДТ: 0,84 кг/л [40]

Годовой моторесурс на один плуг: 200 моточасов [58]

Общий моторесурс парка: 200 000 м/ч

Расход топлива для серийных лемехов: $200\,000 \times 80 \times 0,26 / 0,84 = 4\,952\,380$ л

Таблица 5.2. – Общий годовой экономический эффект

Статья расходов/экономии	Сумма, руб./год
Затраты на закупку лемехов (серийные)	3 600 000
Затраты на закупку лемехов (упрочненные)	6 533 352
Перерасход на закупку	–2 933 352
Экономия на заменах (труд + техника)	696 000
Экономия на логистике	30 000
Экономия на топливе	16 095 235
Итого: годовой экономический эффект	13 887 883

Расход топлива для упрочненных лемехов: $4\,952\,380 \times 0,95 = 4\,704\,761$ л

Экономия топлива: $4\,952\,380 - 4\,704\,761 = 247\,619$ л

Экономия на топливе: $247\,619 \times 65 = 16\,095\,235$ руб.

Срок окупаемости капитальных вложений

Предположим, хозяйство впервые внедряет технологию и приобретает оборудование: Ток = $15\,250\,000 / 13\,887\,883 \approx 1.1$ года

Таким образом переход на упрочнённые лемехи приносит сельскохозяйственным предприятиям целый ряд дополнительных преимуществ, выходящих за рамки прямой экономии на замене рабочих органов [28, 38]. Эти преимущества носят системный характер и оказывают долгосрочное положительное влияние на весь производственный цикл: снижение износа сопрягаемых деталей плуга, улучшение качественных показателей обработки почвы, повышение эксплуатационной надёжности, положительная экологическая составляющая за счёт экономии топлива и улучшение условий труда механизаторов [23, 24, 61].

Совокупность этих факторов делает переход на упрочнённые лемехи не просто заменой одного элемента конструкции, а полноценной модернизацией всего процесса почвообработки [58]. Эффект от внедрения носит кумулятивный характер - преимущества накапливаются и усиливают друг друга в течение всего срока эксплуатации. Особенно заметно это проявляется в крупных хозяйствах, где даже незначительное улучшение отдельных показателей в масштабах всего предприятия даёт существенный экономический и технологический эффект [41].

5.5 Выводы по главе 5

На основании проведенного технико-экономического обоснования можно сделать следующие выводы:

1. Разработана и обоснована инновационная технология изготовления плужного лемеха, позволяющая создать многослойную структуру, оптимально сочетающую высокую прочность и ударную вязкость

основы с исключительной износостойкостью и коррозионной стойкостью рабочей поверхности [61, 64, 65, 79].

2. Доказано значительное повышение эксплуатационных характеристик. Результаты лабораторных и полевых испытаний однозначно подтверждают эффективность новой технологии [28, 38, 100]:

- Ресурс упрочненного лемеха составляет 759 га, что в 2.5 раза превышает ресурс серийного лемеха из стали 65Г (320 га)
- Износостойкость повышена в 2.5 раза [100, 115]
- Ударная вязкость при отрицательных температурах (-20°C) увеличена на 40% (с 32 до 45 Дж/см²) [57, 79]
- Зафиксировано снижение тягового сопротивления плуга на 5% за счет улучшенных антифрикционных свойств покрытия TiN [111, 118]

3. Проведенный экономический анализ доказывает высокую эффективность внедрения технологии [28, 38]:

- Сокращение количества замен лемехов на ~58% приводит к пропорциональному уменьшению трудозатрат, простоев техники и логистических расходов [71, 74]
- Экономия на топливе, обусловленная снижением тягового сопротивления, является наиболее весомой статьей экономии [54, 63]
- Для сельскохозяйственного предприятия с парком из 1000 плугов общий годовой экономический эффект составляет 13.89 млн рублей
- Срок окупаемости капитальных вложений в оборудование для производства составляет около 1 года при таком масштабе [41]

4. Технология обеспечивает комплексные преимущества, способствующие повышению общей производительности, улучшению качества обработки почвы, увеличению межремонтного периода плугов, снижению аварийности и улучшению условий труда механизаторов [71, 74].

5. Технология обладает высоким потенциалом для масштабирования и является особенно привлекательной и выгодной для крупных сельскохозяйственных предприятий [41].

Таким образом, разработанная технология изготовления плужного лемеха с комплексным упрочнением является технически обоснованной, эксплуатационно эффективной и экономически целесообразной [28, 38, 100]. Она представляет собой перспективное решение для модернизации почвообрабатывающей техники, способное значительно повысить производительность и снизить себестоимость сельскохозяйственных работ [57].

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 ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авторское свидетельство № 1803469 А1 СССР, МПК С23С 10/32, С23С 10/40. Способ диффузионного хромирования в вакууме / В. Н. Бугаев, Ю. В. Мазаев, В. В. Евсиков [и др.] ; заявитель МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ИМ.В.П.ГОРЯЧКИНА. – № 4939253 ; заявл. 22.05.1991 ; опубл. 23.03.1993. – EDN KULTKU.
2. 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.
3. 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.
4. Бадекин М.Ю., Борулько В.Г., Балабанов В.И., Ивахненко Н.Н. Физико-математическая модель абразивного износа сормайтовых наплавов после вакуумной термообработки // Наука в Центральной России. 2025. Т. 76, № 4. С. 139-148. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2025-4-139-148>.
5. Балабанов, В. И. Анализ технологий восстановления коленчатых валов автотракторной техники / В. И. Балабанов, Д. В. Добряков // Агроинженерия. – 2024. – Т. 26, № 5. – С. 31-38. – DOI 10.26897/2687-1149-2024-5-31-38. – EDN SHADZX.
6. Балабанов, В. И. Совершенствование технологического процесса фрикционного нанесения защитных покрытий / В. И. Балабанов, И. Г. Голубев, Д. В. Добряков // Техника и оборудование для села. – 2023. – № 10(316). – С. 31-34. – DOI 10.33267/2072-9642-2023-10-31-34. – EDN FCIBDY.
7. Балькова, Т. И. Современное материаловедение : учебное пособие для студентов очной и заочной формы обучения по направлениям

«Агроинженерия» и «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» / Т. И. Балькова, С. М. Гайдар, А. М. Пикина. – Москва : РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2023. – 124 с. – EDN FLHRKE.

8. Бижаев, А. В. Результаты экспериментальных исследований добавок воды в камеру сгорания дизельного двигателя / А. В. Бижаев, С. Н. Девянин // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2016. – № 2. – С. 36-39. – EDN VTPVOJ.

9. Бугаев, В. Н. Повышение долговечности плунжерных пар / В. Н. Бугаев, С. П. Казанцев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1988. – № 1. – С. 29-30. – EDN ZFDGEV.

10. Гайдар, С. М. Влияние легирующих элементов и термической обработки на механические свойства низколегированных сталей / С. М. Гайдар, С. М. Ветрова, А. С. Барчукова // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2023. – № 9. – С. 11-15. – DOI 10.31044/1684-2561-2023-0-9-11-15. – EDN OTJNAW.

11. Гайдар, С. М. Противоизносная присадка к смазочным материалам, полученная из жиросодержащих отходов мясоперерабатывающих предприятий / С. М. Гайдар, О. М. Лапсарь // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 41-45. – DOI 10.26897/2687-1149-2023-2-41-45. – EDN WFYZDS.

12. Голубев, И. Г. Модернизация технологических машин как механизм продления назначенных ресурса и срока службы / И. Г. Голубев, Н. С. Севрюгина, А. С. Апатенко, А. Ю. Фомин // Вестник машиностроения. – 2023. – Т. 102, № 1. – С. 36-41. – DOI 10.36652/0042-4633-2023-102-1-36-41. – EDN OLAGTY.

13. Девянин, С. Н. Анализ качества конструкций почвообрабатывающих машин для средств малой механизации агроинженерии класса тяги 0,2 / С. Н. Девянин, И. И. Сапожников, В. А. Шмонин // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – № 8. – С. 44-47. – EDN WHWYYR.

14. Девянин, С. Н. Анализ технического регулирования качества средств малой механизации агроинженерии до класса тяги 0,2 / С. Н. Девянин, И. И.

Сапожников // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 9. – С. 36-41. – EDN ULHBKF.

15. Девянин, С. Н. Регулирование качества конструкции средства малой механизации тягового класса 0,2 / С. Н. Девянин, И. И. Сапожников // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 4. – С. 38-42. – EDN SCCQXD.

16. Дидманидзе, О. Н. Метод наплавки порошковых материалов с применением плазмотрона для наплавки износостойких материалов / О. Н. Дидманидзе // Агропродовольственная экономика. – 2020. – № 3. – С. 26-34. – EDN VCYLEO.

17. Дидманидзе, О. Н. Проблемы повторного использования рециклируемых материалов / О. Н. Дидманидзе, Г. Е. Митягин // Доклады ТСХА, Москва, 02–04 декабря 2014 года. Том 1. – Москва: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2016. – С. 182-185. – EDN XHAYUG.

18. Дидманидзе, О. Н. Повышение надежности сельскохозяйственной техники / О. Н. Дидманидзе, М. Ю. Карелина, Е. П. Парлюк // Чтения академика В.Н. Болтинского : сб. ст. семинара, Москва, 20–21 января 2021 года. Том Часть 2. – Москва: ООО «Сам полиграфист», 2021. – С. 8-14. – EDN BDJXTN.

19. Дорохов, А. С. Определение динамической вязкости наполненных композиций на основе термореактивного литьевого полиуретана / А. С. Дорохов, Ю. А. Гончарова, А. С. Свиридов [и др.] // Химическая технология. – 2022. – Т. 23, № 12. – С. 502-506. – DOI 10.31044/1684-5811-2022-23-12-502-506. – EDN CGKRRT.

20. Дорохов, А. С. Стратегии технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственных машин / А. С. Дорохов, А. В. Денисов, А. А. Соломашкин, В. С. Герасимов // Технический сервис машин. – 2020. – № 3(140). – С. 38-48. – DOI 10.22314/2618-8287-2020-58-3-38-48. – EDN HVXYMF.

21. Ерохин, М. Н. Влияние технологических режимов CVD-процесса на свойства получаемых хромовых покрытий / М. Н. Ерохин, С. П. Казанцев, Н.

- Н. Чупятков // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2015. – № 6(70). – С. 17-21. – EDN VDNVMT.
22. Ерохин, М. Н. Деформация прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей при восстановлении методом диффузионной металлизации / М. Н. Ерохин, С. П. Казанцев, А. Г. Пастухов [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2022. – Т. 16, № 3. – С. 4-11. – DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-4-11. – EDN LUIYIQ.
23. Ерохин, М. Н. Диффузионные покрытия в ремонтном производства / М. Н. Ерохин, С. П. Казанцев ; М-во сельского хоз-ва Российской Федерации, Федеральное гос. образовательное учреждение высш. проф. образования Московский гос. агроинженерный ун-т им. В. П. Горячкина. – Москва : [ФГОУ ВПО МГАУ], 2006. – 124 с. – ISBN 5-86785-171-0. – EDN QKYHRF.
24. Ерохин, М. Н. Изучение прочности сцепления карбидосодержащего хромового CVD-покрытия с подложкой из качественной углеродистой стали / М. Н. Ерохин, Н. Н. Чупятков // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2016. – № 2(72). – С. 47-51. – EDN VSKLQD.
25. Ерохин, М. Н. Износостойкость низколегированных сталей в абразивной среде / М. Н. Ерохин, С. М. Гайдар, Д. М. Скороходов [и др.] // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 72-78. – DOI 10.26897/2687-1149-2023-3-72-78. – EDN QVBHFB.
26. Ерохин, М. Н. Износостойкость прецизионных деталей гидравлических систем, восстановленных карбидохромовым покрытием / М. Н. Ерохин, Н. Н. Чупятков // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2016. – № 3(73). – С. 41-45. – EDN WAGPKB.

27. Ерохин, М. Н. Перспективы применения наноматериалов при изготовлении и ремонте машин и оборудования для животноводства / М. Н. Ерохин, Л. В. Козырева // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2012. – № 4(8). – С. 82-86. – EDN PXHODR.
28. Ерохин, М. Н. Повышение прочности и износостойкости лемеха плуга / М. Н. Ерохин, В. С. Новиков // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2008. – № 3(28). – С. 100-107. – EDN JWWZUV.
29. Ерохин, М. Н. Повышение работоспособности гидравлических систем с применением CVD-метода металлоорганических соединений / М. Н. Ерохин, Н. Н. Чупятов // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2013. – № 3(59). – С. 39-41. – EDN TEFXML.
30. Ерохин, М. Н. Применение химического парофазного осаждения для повышения износостойкости прецизионных деталей гидравлических систем машин и оборудования в животноводстве / М. Н. Ерохин, Н. Н. Чупятов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2013. – № 4(12). – С. 61-64. – EDN RNIULZ.
31. Ерохин, М. Н. Прогнозирование долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин при их разработке / М. Н. Ерохин, В. С. Новиков // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2017. – № 6(82). – С. 56-62. – DOI 10.26897/1728-7936-2017-6-56-62. – EDN ZWKXYF.
32. Ерохин, М. Н. Разработка методики управления процессом формирования CVD-покрытий на внешней поверхности цилиндрической

подложки / М. Н. Ерохин, Л. В. Плетнев, Н. Н. Чупятов // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2016. – № 5(75). – С. 25-30. – EDN WMULBN.

33. Ерохин, М. Н. Технологическое оснащение процесса получения металлических покрытий CVD-методом металлоорганических соединений / М. Н. Ерохин, С. П. Казанцев, Н. Н. Чупятов // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2018. – № 6(88). – С. 40-44. – DOI 10.26897/1728-7936-2018-6-40-44. – EDN YQDQQH.

34. Ерохин, М. Н. Управление процессом формирования карбидохромовых cvd-покрытий на внешней поверхности цилиндрической подложки / М. Н. Ерохин, Л. В. Плетнев, Н. Н. Чупятов // Труды ГОСНИТИ. – 2016. – Т. 124, № 3. – С. 26-34. – EDN WWRUIZ.

35. Ерохин, М. Н. Выбор марки стали для лемеха плуга / М. Н. Ерохин, В. С. Новиков, Д. А. Сабуркин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2008. – № 1. – С. 5-9. – EDN IJOWDN.

36. Заявка на патент № 2025617418 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025617418. «Программа статистической обработки линейных величин износа деталей» : заявл. 14.03.2025 : опубл. 25.03.2025 / И. Н. Кравченко, С. А. Феськов, А. Ю. Фомин [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева». – EDN SKBDUZ.

37. Заявка на патент № 2025666063 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025666063. «Программа для обработки данных профилей изношенных деталей

почвообрабатывающих машин» : заявл. 14.03.2025 : опубл. 23.06.2025 / А. Ю. Фомин, И. Н. Кравченко, С. А. Феськов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева». – EDN ТТАНІМ.

38. Зорин, В. А. Основы теории трения и изнашивания : практикум для закрепления знаний лекционного материала по курсу / В. А. Зорин, Ю. В. Штефан. – Москва : МАДИ, 2023. – 126 с. – EDN MOTVVX.

39. Ивахненко, Н. Н. Оптимизация режимов вакуумного отжига для повышения износостойкости лемехов почвообрабатывающих орудий / Н. Н. Ивахненко, М. Ю. Бадекин, В. Г. Борулько, В. И. Балабанов, Д. V. Поручиков // Технический сервис машин. – 2025. – Т. 63, № 3. – С. 67-75. – DOI 10.22314/2618-8287-2025-63-3-67-75. – EDN WFGTTP.

40. 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.

41. Интенсификация процесса борирования сталей / В. Н. Бугаев, С. П. Казанцев, В. К. Ильин, Н. А. Бардадын // Технический сервис в агропромышленном комплексе : сб. науч. тр. – Москва : МГАУ им. В.П. Горячкина, 1992. – С. 18-22. – EDN YIDMYN.

42. Исследование синергетического эффекта контактных ингибиторов анодного и катодного действия при защите стали от коррозии / С. М. Гайдар, В. Е. Коноплев, Д. И. Петровский [и др.] // Коррозия: материалы, защита. – 2021. – № 12. – С. 10-14. – DOI 10.31044/1813-7016-2021-0-12-10-14. – EDN NCBAHXN.

43. Казанцев, С. П. Восстановление изношенных деталей многокомпонентной диффузионной металлизацией / С. П. Казанцев, В. А. Прилепин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1998. – № 4. – С. 31-32. – EDN ZFDGMN.

44. Казанцев, С. П. Разработка комбинированной технологии получения железоборидных покрытий при восстановлении и упрочнении деталей сельскохозяйственной техники: специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве" : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Казанцев Сергей Павлович. – Москва, 2006. – 32 с. – EDN NJYXMN.
45. Казанцев, С. П. Разработка комбинированной технологии получения железоборидных покрытий при восстановлении и упрочнении деталей сельскохозяйственной техники : специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйства" : дис. ... д-ра техн. наук / Казанцев Сергей Павлович. – Москва, 2006. – 301 с. – EDN NOANMR.
46. Казанцев, С. П. Совершенствование технологии восстановления и упрочнения деталей машин железоборидными покрытиями / С. П. Казанцев // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2005. – № 1. – С. 30-31. – EDN HVBPTB.
47. Казанцев, С. П. Технология восстановления деталей сельскохозяйственной техники нанесением железоборидных покрытий / С. П. Казанцев, В. Н. Боярский, О. П. Андреев // Техника в сельском хозяйстве. – 2001. – № 2. – С. 34-35. – EDN WRPZFI.
48. Казанцев, С. П. Новая технология получения комбинированных диффузионных покрытий / С. П. Казанцев // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2003. – № 7. – С. 30-32. – EDN ZFDIGH.
49. Кравченко, И. Н. Остаточные напряжения в покрытиях, образованных методом электроискровой обработки / И. Н. Кравченко, С. А. Величко, В. А. Денисов [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2023. – № 4. – С. 52-60. – DOI 10.31857/S0235711923040077. – EDN XVKCJX.
50. Кравченко, И. Н. Оценка работоспособности и долговечности восстановленных деталей и соединений / И. Н. Кравченко, С. А. Величко, А. В. Мартынов [и др.] // Технология металлов. – 2023. – № 7. – С. 42-48. – DOI 10.31044/1684-2499-2023-0-7-42-48. – EDN UNNZYK.

51. Кравченко, И. Н. Оценка эксплуатационной надежности шестеренных гидронасосов, отремонтированных с применением метода электроискровой обработки / И. Н. Кравченко, С. А. Величко, А. В. Мартынов [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2023. – № 3. – С. 40-47. – DOI 10.31857/S0235711923030094. – EDN PQIPGI.
52. 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.
53. Лапсарь, О. М. Получение противоизносной добавки к смазывающим материалам из отходов мясной промышленности / О. М. Лапсарь, С. М. Гайдар // Чтения академика В. Н. Болтинского, Москва, 25–26 января 2023 года. Том 2. – Москва: ООО «Сам полиграфист», 2023. – С. 111-117. – EDN JUQXDG.
54. Марков, В. А. Работа дизелей на многокомпонентных водотопливных эмульсиях / В. А. Марков, С. Н. Девянин, В. А. Шумовский // Транспорт на альтернативном топливе. – 2014. – № 2(38). – С. 23-32. – EDN RXTTYR.
55. Марков, В. А. Работа дизеля на дизельном топливе с добавкой этанола / В. А. Марков, В. В. Бирюков, С. Н. Девянин // Транспорт на альтернативном топливе. – 2015. – № 2(44). – С. 18-28. – EDN TWPWXX.
56. Машины для строительства и эксплуатации гидромелиоративных систем / В. И. Балабанов, Н. К. Усманов, И. Ж. Худаев [и др.]. – Саратов : ООО "Амирит", 2023. – 278 с. – ISBN 978-5-00207-184-5. – EDN TFCSEY.
57. Мишнев, Р. В. Влияние температуры отпуска на механические свойства низколегированной стали с 0,34%с / Р. В. Мишнев, Ю. И. Борисова, О. Н. Дидманидзе [и др.] // Физическая мезомеханика материалов. Физические принципы формирования многоуровневой структуры и механизмы нелинейного поведения : тезисы докладов Международной конференции, Томск, 05–08 сентября 2022 года. – Новосибирск: Новосибирский

национальный исследовательский государственный университет, 2022. – С. 167. – DOI 10.25205/978-5-4437-1353-3-101. – EDN UDPGBC.

58. Основы теории мобильных сельскохозяйственных агрегатов / В. А. Самсонов, А. А. Зангиев, Ю. Ф. Лачуга, О. Н. Дидманидзе. – Москва : Колос, 2000. – 248 с. – EDN RSSLUF.

59. Остаточные напряжения в покрытиях, образованных методом электроискровой обработки / И. Н. Кравченко, С. А. Величко, В. А. Денисов [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2023. – № 4. – С. 52-60. – DOI 10.31857/S0235711923040077. – EDN XVKCJX.

60. Пат. 2154695 С1 Российская Федерация, МПК С23С 12/00. Способ восстановления и упрочнения стальных деталей / В. Н. Боярский, С. П. Казанцев, Н. П. Кодинцев ; заявитель Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. – № 99122240/02 ; заявл. 27.10.1999 ; опубл. 20.08.2000. – EDN GDDNII.

61. Пат. 2779102 С1 Российская Федерация, МПК С22С 38/22, С21D 8/00. Способ получения высокопрочной хромомолибденовой стали / А. Н. Беляков, С. М. Гайдар, О. Н. Дидманидзе [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева". – № 2021133384 ; заявл. 17.11.2021 ; опубл. 31.08.2022. – EDN QRZCEE.

62. Пат. 2794891 С1 Российская Федерация, МПК С08К 7/04, С08L 75/04, С08J 5/04. Композиционный износостойкий материал для изготовления диафрагм мембранно-поршневых насосов / А. С. Дорохов, Ю. А. Гончарова, А. С. Свиридов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ". – № 2022123893 ; заявл. 08.09.2022 ; опубл. 25.04.2023. – EDN HAWIFF.

63. Пат. 2796454 С1 Российская Федерация, МПК G01N 19/06. Способ диагностики состояния поверхностного слоя твердотельной мишени под действием внешних нагрузок / И. Н. Кравченко, А. Л. Галиновский, А. С.

Вышегородцева [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева". – № 2022126573 ; заявл. 12.10.2022 ; опубл. 23.05.2023. – EDN BVHNBON.

64. Пат. 2798238 С1 Российская Федерация, МПК С22С 38/34, С22С 38/32, С22С 38/28. Высокопрочная низколегированная сталь для сельскохозяйственной техники / Р. В. Мишнев, Ю. И. Борисова, Е. С. Ткачев [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева". – № 2022121571 ; заявл. 09.08.2022 ; опубл. 20.06.2023. – EDN XFLLGZ.

65. Пат. 2800436 С1 Российская Федерация, МПК С21D 8/00, С22С 38/38, С22С 38/34. Способ изготовления заготовки режущего лезвийного инструмента сельскохозяйственной землеройной техники из высокопрочной стали / Р. В. Мишнев, Ю. И. Борисова, Е. С. Ткачев [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева". – № 2022123097 ; заявл. 29.08.2022 ; опубл. 21.07.2023. – EDN PQIZCR.

66. Пат. 2821971 С1 Российская Федерация, МПК С23С 26/00, С10М 103/06. Технологический состав для фрикционно-mechanical'ческого нанесения покрытия натирающим инструментом / В. И. Балабанов, Д. V. Добряков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева". – № 2023122292 ; заявл. 28.08.2023 ; опубл. 28.06.2024. – EDN TPLHVJ.

67. Пат. 2834102 С1 Российская Федерация, МПК С23С 4/10, С23С 4/137, С23С 14/16. Способ поверхностного упрочнения рабочего органа сельскохозяйственной машины / 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". – заявл. 07.05.2024 ; опубл. 03.02.2025. – EDN ASIEIR.

68. Пегачков, А. А. Обеспечение долговечности машин по результатам анализа технического состояния : учебное пособие / А. А. Пегачков, В. А. Зорин. – Москва : МАДИ, 2023. – 120 с. – EDN MIMNHU.

69. Пикина, А. М. Повышение долговечности тонколистовых конструкций, разъемных и неразъемных соединений сельскохозяйственной техники в условиях эксплуатации : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Пикина Анна Михайловна. – Москва, 2022. – 176 с. – EDN EFAMXB.

70. 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.

71. Парлюк, Е. П. Использование мономолекулярной защитной пленки на поверхности узлов трения для повышения надежности сельскохозяйственной техники / Е. П. Парлюк // Технический сервис машин. – 2021. – № 3(144). – С. 155-164. – DOI 10.22314/2618-8287-2021-59-3-155-164. – EDN INKUUR.

72. Парлюк, Е. П. Применение наножидкостей в качестве теплоносителя в охладителях функциональных агрегатах автотракторной техники / Е. П. Парлюк // Наука в центральной России. – 2021. – № 5(53). – С. 73-79. – DOI 10.35887/2305-2538-2021-5-73-79. – EDN XUUGIO.

73. Парлюк, Е. П. Повышение надежности силовых установок в условиях граничного трения / Е. П. Парлюк // Чтения академика В. Н. Болтинского : семинар, Москва, 20–21 января 2021 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Сам Полиграфист", 2021. – С. 27-33. – EDN QAPZXX.

74. Парлюк, Е. П. Пути повышения долговечности и безотказности функциональных агрегатов автотракторной техники / Е. П. Парлюк // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2021. – Т. 68, № 4(45). – С. 148-154. – DOI 10.22314/2658-4859-2021-68-4-148-154. – EDN IXPQIX.

75. Применение интерметаллидов для повышения износостойкости покрытий при скоростном ТВЧ-борировании / А. С. Дорохов, А. В. Ишков, В. В. Иванайский [и др.] // Технический сервис машин. – 2019. – № 3(136). – С. 143-155. – EDN GVHXTN.
76. Практика применения плазменно-порошковой наплавки при восстановлении изношенных деталей машин / Д. Б. Слинко, А. С. Дорохов, В. А. Денисов, В. П. Лялякин // Технология машиностроения. – 2019. – № 3. – С. 32-37. – EDN VFRRXP.
77. Работоспособность технических систем : учебник для вузов по изучению дисциплины / С. К. Тойгамбаев, О. Н. Дидманидзе, А. С. Апатенко [и др.]. – Москва : РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2022. – 379 с. – EDN NGPUWV.
78. Разумов, И. К. К теории фазовых превращений в железе и стали на основе первопринципных подходов / И. К. Разумов, Ю. Н. Горностырев, М. И. Кацнельсон // Физика металлов и металловедение. – 2017. – Т. 118, № 4. – С. 380-408. – DOI 10.7868/S001532301704009X. – EDN YIUUYFN.
79. Роль остаточного аустенита в высокой прочности и пластичности низколегированной стали / Р. В. Мишнев, Ю. И. Борисова, М. Н. Ерохин [и др.] // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2023. – Т. 512, № 1. – С. 73-77. – DOI 10.31857/S2686740023050097. – EDN URYAUW.
80. Современная агроинженерия / В. И. Трухачев, О. Н. Дидманидзе, М. Н. Ерохин [и др.]. – Москва : ООО «Мегаполис», 2022. – 413 с. – ISBN 978-5-6049928-2-1. – EDN RSFSFK.
81. Современные роботизированные технические средства для сельского хозяйства : аналитический обзор / В. Я. Гольцяпин, Н. П. Мишуров, В. Ф. Федоренко [и др.]. – Москва : РосНИИТЭИАПК, 2023. – 84 с. – ISBN 978-5-7367-1776-7. – EDN TNBBOR.
82. Тохметова, А. Б. Повышение трибологических свойства смазочного масла легированием микро-/нанодобавками : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Тохметова Айгерим Бауыржановна. – 2023. – 113 с. – EDN HQHLPI.

83. Федотов, А. В. Повышение долговечности деталей и агрегатов сельскохозяйственной техника с использованием наноструктурного оксигидроксида алюминия : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.03 / Федотов Анатолий Валентинович. – 2022. – 283 с. – EDN UGRQCH.
84. Физико-механические свойства керамических покрытий, получаемых короткоимпульсной лазерной наплавкой порошковой смеси на основе бора / А. Г. Ипатов, М. Н. Ерохин, С. П. Казанцев [и др.] // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 71-76. – DOI 10.26897/2687-1149-2023-1-71-76. – EDN NIWNZG.
85. Формирование свойств рабочих поверхностей ответственных изделий плазменной наплавкой и поверхностной термообработкой током обратной полярности / В. Ю. Щицын, С. М. Гайдар, Ю. Д. Щицын, Э. С. Э. Кастелл // Технология металлов. – 2018. – № 5. – С. 22-28. – EDN OSHKEV.
86. Ветрова, С. М. Влияние термической обработки на механические свойства низколегированной стали / С. М. Ветрова, А. С. Барчукова // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых, Могилев, 26–27 октября 2023 года. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2023. – С. 54. – EDN VNVYHF.
87. Ветрова, С. М. Упрочнение рабочих органов сельхозтехники с помощью термической обработки / С. М. Ветрова, А. С. Барчукова, С. М. Гайдар // Чтения академика В. Н. Болтинского, Москва, 25–26 января 2023 года. Том 2. – Москва: ООО «Сам полиграфист», 2023. – С. 103-110. – EDN KVERSV.
88. Alvi S., Saeidi K., Akhtar F. High temperature tribology and wear of selective laser melted (SLM) 316L stainless steel // Wear. – 2020. – Vol. 448. – P. 203228. – DOI: 10.1016/j.wear.2020.203228.
89. Aramide B. et al. Improving the durability of tillage tools through surface modification—a review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 116, № 1. – P. 83–98. – DOI: 10.1007/s00170-021-07487-4.

90. Balabanov V. I. Developing the technology of friction alitising / V. I. Balabanov, D. V. Dobryakov, A. Yu. Alipichev // Agricultural Engineering. – 2023. – Vol. 25, No. 5. – P. 52-56. – DOI 10.26897/2687-1149-2023-5-52-56. – EDN SVRAAW.
91. 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. – Washington: SPIE-SOC PHOTO-OPTICAL INSTRUMENTATION ENGINEERS, 2024. – P. 1321703. – DOI 10.1117/12.3035599. – EDN OSKGHF.
92. Bedolla P. O. et al. Combined experimental and numerical simulation of abrasive wear and its application to a tillage machine component // Tribology International. – 2018. – Vol. 127. – P. 122–128. – DOI: 10.1016/j.triboint.2018.03.019.
93. Bejinariu C. et al. Microstructural, Corrosion Resistance, and Tribological Properties of Al₂O₃ Coatings Prepared by Atmospheric Plasma Spraying // Materials. – 2022. – Vol. 15, № 24. – P. 9013. – DOI 10.3390/ma15249013.
94. Cucinotta F. et al. On the morphology of the abrasive wear on ploughshares by means of 3D scanning // Biosystems Engineering. – 2019. – Vol. 179. – P. 117–125. – DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2019.01.006.
95. Didmanidze, O. N. Use of monomolecular protective film in friction units of agricultural machinery / O. N. Didmanidze, E. P. Parlyuk, N. N. Pulyaev // AIP Conference Proceedings : 2, Krasnoyarsk, 29–31 июля 2021 года. – Krasnoyarsk, 2022. – P. 020044. – DOI 10.1063/5.0092445. – EDN GHMYAI.
96. Formation of the Properties of the Working Surfaces of Important Parts by Plasma Surfacing and Surface Heat Treatment by a Reversed-Polarity Current / V. Y. Shchitsyn, S. M. Gaidar, Y. D. Shchitsyn, E. S. E. Kastell // Russian Metallurgy (Metally). – 2018. – Vol. 2018, No. 13. – P. 1296-1300. – DOI 10.1134/S0036029518130207. – EDN DICDZQ.

97. Hutsaylyuk V. et al. Improvement of wear resistance of aluminum alloy by HVOF method // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2020. – Vol. 9, № 6. – P. 16367–16377. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.11.102.
98. 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.
99. Residual Stresses in Coatings Formed by Electrosark Treatment / I. N. Kravchenko, S. A. Velichko, V. A. Denisov [et al.] // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2023. – Vol. 52, No. 4. – P. 335-342. – DOI 10.3103/S1052618823040076. – EDN VAVTKH.
100. The Tribotechnical Properties of Electrosarks with a Secondary Bronze Coating / A. S. Dorokhov, V. A. Denisov, R. N. Zadorozhny [et al.] // *Coatings*. – 2022. – Vol. 12, No. 3. – DOI 10.3390/coatings12030312. – EDN DHBYKS.
101. Vrublevskiy O. et al. Volumetric wear characteristics as a result of the tribological interaction between the soil with working parts cultivator's and plough's // *Eksplatacja i Niezawodność*. – 2022. – Vol. 24, № 4. – P. 707-718. – DOI:10.17531/ein.2022.4.11
102. Kalácska Á. et al. Abrasive wear behaviour of 27MnB5 steel used in agricultural tines // *Wear*. – 2020. – Vol. 442. – P. 203107. – DOI: 10.1016/j.wear.2019.203107.
103. Kang A. S., Cheema G. S., Singla S. Wear behavior of hardfacings on rotary tiller blades // *Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 97. – P. 1442–1451. – DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.426.
104. Kumari K. et al. Effect of microstructure on abrasive wear behavior of thermally sprayed WC–10Co–4Cr coatings // *Wear*. – 2010. – Vol. 268, № 11–12. – P. 1309–1319. – DOI: 10.1016/j.wear.2010.02.001.
105. Liu X. et al. Effect of multi-directional forging and annealing on abrasive wear behavior in a medium carbon low alloy steel // *Tribology International*. – 2018. – Vol. 119. – P. 608–613. – DOI: 10.1016/j.triboint.2017.11.043.

106. Nalbant M., Palali A. T. Effects of different material coatings on the wearing of plowshares in soil tillage // Turkish Journal of Agriculture and Forestry. – 2011. – Vol. 35, № 3. – P. 215–223. – DOI: 10.3906/tar-0904-30.
107. Oki M., Anawe P. A. A review of corrosion in agricultural industries // Physical Science International Journal. – 2015. – Vol. 5, № 4. – P. 216–222.
108. QiangHe J. The research progress of agricultural straw crushing machinery and the main problems discussed // Int. J. Res. Eng. Sci. – 2015. – Vol. 3, № 5. – P. 56–60.
109. Qiu H. et al. Experimental research on friction and wear properties of rotary tiller wet-land curved blade // Lubr. Eng. – 2016. – Vol. 41, № 8. – P. 53–56.
110. Refai M. et al. Reducing the wear and corrosion of the agricultural mower steel knives by electrodeposition nanocomposite coatings–Review // Egyptian Journal of Chemistry. – 2020. – Vol. 63, № 8. – P. 3075–3095.
111. Refai M. et al. Electrodeposition of Ni–ZnO nano-composite for protecting the agricultural mower steel knives // Chemical Papers. – 2021. – Vol. 75, № 1. – P. 139–152. – DOI: 10.1007/s11696-020-01291-2.
112. Samal P. et al. Recent progress in aluminum metal matrix composites: A review on processing, mechanical and wear properties // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 59. – P. 131–152. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.09.010.
113. Su Z. et al. Effect of process parameters on microstructure and tribological properties of Ni60A/Cr3C2 laser cladding on 60Si2Mn steel // Surface and Coatings Technology. – 2023. – Vol. 473. – P. 130005. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.130005.
114. Thakare M. R. et al. Effect of abrasive particle size and the influence of microstructure on the wear mechanisms in wear-resistant materials // Wear. – 2012. – Vol. 276. – P. 16–28. – DOI: 10.1016/j.wear.2011.11.008.
115. Tulaganova L., Yunushuzhaev S., Juraeva G. Improving the wear resistance and durability of cultivator tools // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2022. – Vol. 2373, № 2. – P. 022026. – DOI: 10.1088/1742-6596/2373/2/022026.

116. Vargova M. et al. Research of resistance of selected materials to abrasive wear to increase the ploughshare lifetime // *Metals*. – 2022. – Vol. 12, № 6. – P. 940. – DOI: 10.3390/met12060940.
117. Wang Q. et al. Effect of WC grain size and abrasive type on the wear performance of HVOF-sprayed WC-20Cr3C2-7Ni coatings // *Coatings*. – 2020. – Vol. 10, № 7. – P. 660. – DOI: 10.3390/coatings10070660.
118. Yazici A. Wear behavior of carbonitride-treated ploughshares produced from 30MnB5 steel for soil tillage applications // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2011. – Vol. 53, № 5. – P. 248–253. – DOI: 10.1007/s11041-011-9377-z.
119. Yu H. et al. Bionic design of tools in cutting: Reducing adhesion, abrasion or friction // *Wear*. – 2021. – Vol. 482. – P. 203955. – DOI: 10.1016/j.wear.2021.203955.
120. Zhang J. et al. Analysis of the wear-resistance characteristics of bionic ridge structures // *Applied Engineering in Agriculture*. – 2020. – Vol. 36, № 5. – P. 697–702. – DOI: 10.13031/aea.13680.
121. Zhang Y., Tian Y., Meng Y. Wear behavior of spindles of cotton picker in field work // *Journal of Tribology*. – 2021. – Vol. 143, № 2. – P. 021703. – DOI: 10.1115/1.4047790.
122. Abdel Hamid Z. et al. Use of a Ni-TiO₂ nanocomposite film to enhance agricultural cutting knife surfaces by electrodeposition technology // *Journal of Materials Science*. – 2021. – Vol. 56, № 25. – P. 14096–14113. – DOI: 10.1007/s10853-021-06189-2.
123. Czupryński A. Microstructure and Abrasive Wear Resistance of Metal Matrix Composite Coatings Deposited on Steel Grade AISI 4715 by Powder Plasma Transferred Arc Welding Part 2. Mechanical and Structural Properties of a Nickel-Based Alloy Surface Layer Reinforced with Particles of Tungsten Carbide and Synthetic Metal–Diamond Composite // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, № 11. – P. 2805. – DOI: 10.3390/ma14112805.

124. Dabees S. et al. Characterization and evaluation of engineered coating techniques for different cutting tools // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, № 16. – P. 5633. – DOI: 10.3390/ma15165633.
125. Gavrilov A.N., Sukhanova N.V., Rylev S.S. Kinetic approach of plasma processes modeling for synthesis of carbon nanostructures // *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. – 2019. – Vol. 19, no. 5. – P. 862–868. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-862-868
126. Hung F. S. Design of lightweight aluminum alloy building materials for corrosion and wear resistance // *Emerging Materials Research*. – 2020. – Vol. 9, № 3. – P. 750–757. – DOI: 10.1680/jemmr.19.00177.
127. Jankauskas V. et al. Effect of WC grain size and content on low stress abrasive wear of manual arc welded hardfacings with low-carbon or stainless steel matrix // *Wear*. – 2015. – Vol. 328. – P. 378–390.
128. Karoonboonyanan S., Salokhe V. M., Niranatlumpong P. Wear resistance of thermally sprayed rotary tiller blades // *Wear*. – 2007. – Vol. 263, № 1–6. – P. 604–608. – DOI: 10.1016/j.wear.2006.12.072.
129. Kostencki P., Stawicki T., Królicka A. Wear of ploughshare material with regards to the temperature distribution on the rake face when used in soil // *Journal of Tribology*. – 2022. – Vol. 144, № 4. – P. 041704. – DOI: 10.1115/1.4053586.
130. Manani S., Patel N., Pradhan A. K. Effect of modified casting process on toughness and wear resistance of LM25 alloy // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. – 2023. – Vol. 76, № 4. – P. 1095–1102.
131. Tomczyk W., Kowalczyk Z. The wear processes in the aspect of construction quality and the need to apply agricultural machines servicing // *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. – 2016. – Vol. 61, № 2.
132. Ulbrich D. et al. Tribocorrosion and abrasive wear test of 22MnCrB5 hot-formed steel // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, № 11. – P. 3892. – DOI: 10.3390/ma15113892.

133. Vidaković I. et al. Resistance of modified material surfaces for agricultural tillage tools to wear by soil particles // Metalurgija. – 2022. – Vol. 61, № 2. – P. 355–358.
134. Vulshinskaya I. et al. Methods for improving the wear resistance of machine parts operating under conditions of abrasive wear // The scientific heritage. – 2021. – № 66-1. – P. 39–41.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Утверждаю

Акт внедрения научно-исследовательской работы

Повышение долговечности рабочих органом почвообрабатывающих машин методом ионно-плазменного напыления.
наименование работы

Настоящим актом мы подтверждаем, что внедрена технология повышения долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин (лемехов ПЛЖ РЗЗ.31-702) методом вакуумного отжига и нанесения износостойких TiN-покрытий.

1. *В процессе внедрения выполнены работы:* В 2025 году на предприятии внедрена комбинированная технология, включающая: вакуумный отжиг лемехов при 1000°C в течение 180 минут (давление: 0,003 Па) для устранения оксидных включений, формирования диффузионной зоны (200 мкм) и диспергирования карбидов (Cr,Fe)-C₃. Нанесение TiN-покрытий методом катодно-дугового PVD-осаждения толщиной 4 мкм с твердостью 19,37 ГПа и коэффициентом трения 0,3.
2. *Технико-экономические показатели внедрения:* Микротвердость обработанных поверхностей увеличилась в два раза, достигнув значения 8,02 ГПа по сравнению с исходными 4,24 ГПа. Это существенное улучшение характеристик привело к снижению абразивного износа на 40–50%, что значительно повысило долговечность рабочих органов почвообрабатывающих машин. В частности, ресурс лемехов увеличился в 2–3 раза, достигнув показателя 759 га против прежних 460 га до предельного состояния. Помимо этого, внедрение технологии позволило снизить тяговое усилие на 5%, что положительно сказалось на энергоэффективности работы сельскохозяйственной техники. Также стоит отметить экономический эффект от внедрения – затраты на замену деталей сократились на 15–20%, что подтверждает высокую практическую ценность разработанного решения.
3. *Предложения о дальнейшем внедрении:* Технология рекомендована для ремонтных предприятий АПК, специализирующихся на восстановлении рабочих органов почвообрабатывающих машин или серийного производства новых лемехов.

Подписи представителей:

