

Казахский агротехнический исследовательский университет
имени С. Сейфуллина

УДК 621.793.7:631.312.5/7

На правах рукописи

КОСАНОВА ИНДИРА МУРАТОВНА

**Улучшение качества поверхностного слоя тяжело-нагруженных деталей
методом плазменной обработки**

8D07501 – Стандартизация и управление качеством продукции

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научные консультанты
доктор технических наук,
профессор
А.Т. Канаев

доктор технических наук,
профессор
И.П. Мазур
(Липецкий государственный
технический университет)

Республика Казахстан
Астана, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ.....	4
ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	6
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	9
ВВЕДЕНИЕ.....	10
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	15
1.1 Основные виды износа и причины преждевременного выхода из строя рабочих органов при обработке почвы различного механического состава.....	15
1.2 Теоретический анализ процесса плазменной обработки.....	21
1.3 Вопросы управления качеством процесса упрочнения тяжело-нагруженных деталей сельскохозяйственной техники плазменной закалкой.....	24
1.4 Анализ современных методов плазменной обработки стали.....	36
1.5 Обзор нормативно-технической документации.....	45
Выводы к разделу.....	47
2 ОБЪЕКТЫ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	49
2.1 Характеристика объекта исследования.....	49
2.2 Лабораторное оборудование и методы исследований.....	53
2.3 Микроскопическое и рентгеноструктурное исследование образцов... ..	65
Выводы к разделу.....	67
3 ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ТЯЖЕЛО-НАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН.....	69
3.1 Особенности поверхностной плазменной обработки тяжело-нагруженных деталей почвообрабатывающих машин.....	69
3.2 Анализ параметров установки УДГЗ-200 и выбор оптимальных режимов.....	72
3.3 Исследование распределения остаточных напряжений в поверхностном слое стали 65Г после плазменной закалки.....	86
3.4 Разработка рекомендаций по технологической инструкции плазменной закалки лемехов плугов.....	88
3.5 Разработка нормативно-технической документации.....	91
Выводы к разделу.....	94
4 ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА СТАЛИ 65 Г.....	96
4.1 Оценка глубины упрочнённого слоя после плазменной закалки.....	96
4.2 Изменение твердости поверхностного слоя стали в результате обработки.....	97
4.3 Изменение поверхностной износостойкости стали в результате плазменной закалки.....	98
4.4 Оценка износостойкости лемехов плуга и лап культиватора при натуральных испытаниях.....	100

4.5 Оценка трещиностойкости стали путем испытания на ударный изгиб и статического изгиба с анализом повреждаемости материала.....	105
4.6 Исследование повышения коррозионной стойкости стали после плазменной закалки.....	109
Выводы к разделу.....	112
5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДА ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ.....	114
5.1 Оценка технико-экономической эффективности технологии упрочнения.....	114
5.2 Повышение производственно-эксплуатационных показателей за счёт внедрения плазменной закалки в оптимальных режимах.....	116
Выводы к разделу.....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	119
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	121
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Рекомендации к внедрению результатов работы..	132
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Патент на полезную модель.....	137
ПРИЛОЖЕНИЕ В – Технологическая инструкция.....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Стандарт организации.....	139
ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Соглашение о научном сотрудничестве.....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ Е – Справка.....	143

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:
СТ РК 1.2-2021. Национальная система стандартизации Республики Казахстан. Порядок разработки документов по стандартизации.

СТ РК 2.257-2012. Государственная система обеспечения единства измерений Республики Казахстан. Металлы и сплавы. Приборы для измерений твердости. Типовая программа испытаний с целью утверждения типа.

СТ РК 2.15-2021. Государственная система обеспечения единства измерений Республики Казахстан. Государственный метрологический контроль. Основные положения.

СТ РК СТБ 1388-2011. Плуги тракторные лемешные общего назначения. Общие технические условия.

ГОСТ 5639-1982. Методы выявления и определения величины зерна.

ГОСТ 9.106-2021. Единая система защиты от коррозии и старения. Коррозия металлов. Термины и определения.

ГОСТ 9.908-1985. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости.

ГОСТ ISO 9224-2022. Коррозия металлов и сплавов. Основополагающие значения категорий коррозионной агрессивности.

ГОСТ 14959-2016.Metalloпродукция из рессорно-пружинной нелегированной и легированной стали.

ГОСТ 17367-1971. Металлы. Метод испытания на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы.

ГОСТ 9454-1978. Металлы. Метод испытаний на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.

ГОСТ 30480-1997. Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общие требования.

ГОСТ 28033-1989. Сталь. Метод рентгенофлюоресцентного анализа.

ГОСТ 33736-2016. Техника сельскохозяйственная. Машины для глубокой обработки почвы. Методы испытаний.

СТ РК ИСО 14284-2011. Чугун и сталь. Отбор и подготовка образцов для определения химического состава.

СТ РК ISO 6506-1-2017. Материалы металлические. Определение твердости по Бринеллю. Часть 1. Метод испытания.

СТ РК ISO 6506-4-2017. Материалы металлические. Определение твердости по Бринеллю. Часть 4. Таблица значений твердости.

СТ РК ISO 6507-1-2010. Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод измерений.

СТ РК ISO 6508-1-2017. Материалы металлические. Испытание на твердость по Роквеллу. Часть 1. Метод испытания.

ГОСТ 9450-1976. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.

ГОСТ Р 54384-2011. Сталь. Определение и классификация по химическому

составу и классам качества.

ГОСТ 4543-71. Сталь легированная конструкционная, калиброванная.

ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки.

ГОСТ 1050-88. Сталь углеродистая качественная конструкционная.

ГОСТ 18895-1997. Сталь. Метод фотоэлектрического спектрального анализа.

ГОСТ 22536.0-1987. Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Общие требования к методам анализа.

ГОСТ 1050-2013.Metalлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей.

ГОСТ 26877-1991. Metalлопродукция. Методы измерений отклонений формы.

ГОСТ 2-2013. Селитра аммиачная. Технические условия.

ГОСТ 9097-82 Сульфат аммония. Технические условия

СТ РК ISO 45001-2019. Системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья. Требования и руководство по применению.

СТ РК ISO 9001-2016. Системы менеджмента качества. Требования.

СТ РК ISO 14001-2016. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению.

ГОСТ 12.3.039-1985. Система стандартов безопасности труда. Плазменная обработка металлов. Требования безопасности.

ГОСТ 12.2.007.8-1975. Система стандартов безопасности труда. Устройства электросварочные и для плазменной обработки. Требования безопасности.

ГОСТ 12.2.002-1991. Система стандартов безопасности труда. Техника сельскохозяйственная. Методы оценки безопасности.

ГОСТ 12.2.111-2020. Система стандартов безопасности труда. Машины сельскохозяйственные навесные и прицепные. Общие требования безопасности.

ГОСТ 27674-1988 Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения.

ГОСТ 6456-82 Шкурка шлифовальная бумажная. Технические условия.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертации применяют следующие термины с соответствующими определениями:

Качество – характеристика способности продукции или услуги удовлетворять потребности потребителя, определяемая степенью ее соответствия.

Продукция – результат деятельности, представленный в материально-вещественной форме и предназначенный для дальнейшего использования в хозяйственных и иных целях.

Показатель качества продукции – количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих ее качество, рассматриваемая применительно к определенным условиям ее создания, эксплуатации или потребления.

Свойство продукции – это объективная особенность, которая может проявляться при создании, эксплуатации или потреблении.

Жизненный цикл продукции – процессы проектирования, производства, эксплуатации или потребления, хранения, транспортировки, реализации, уничтожения и утилизации продукции.

Стандартизация – деятельность, направленная на обеспечение безопасности и качества объектов стандартизации и достижение оптимальной степени упорядочения требований к объектам стандартизации посредством установления положений для всеобщего, многократного использования в отношении реально существующих и потенциальных задач.

Нормативный технический документ – нормативный документ, содержащий технические и технологические нормы.

Стандарт – документ, в котором в целях многократного использования устанавливаются характеристики продукции, правила осуществления и характеристики процессов проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнения работ или оказания услуг, правила и методы исследований (испытаний) и измерений, правила отбора образцов, требования к терминологии, символике, упаковке, маркировке или этикеткам и правилам их нанесения.

Национальный стандарт – документ по стандартизации, утвержденный уполномоченным органом, доступный широкому кругу пользователей.

Межгосударственный стандарт – региональный стандарт, принятый региональной организацией по стандартизации – Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации Содружества Независимых Государств.

Международный стандарт – документ по стандартизации, принятый международной организацией по стандартизации, доступный широкому кругу пользователей.

Стандарт организации – документ по стандартизации, принятый организацией самостоятельно для реализации ее целей.

Плазменная обработка – процесс обработки материалов и металлов плазмой, генерируемой дуговыми или высокочастотными плазмотронами.

Машинно-тракторный агрегат – техническая система, состоящая из трактора (источника энергии) и одной или нескольких машин, связанных соединительными устройствами, силовыми приводами, электро-, пневмо- и гидروкоммуникациями систем управления, регулирования и контроля и предназначен для выполнения механизированных работ в сельхоз производстве.

Лемех плуга – рабочая часть корпуса плуга, которая служит для подрезания пласта почвы, его подъёма и направления на отвал плуга.

Культиватор – сельскохозяйственная машина для обработки почвы.

Лапа культиватора – основной рабочий орган культиватора, который работает в почве, путем разрезания и разрывания его верхнего шара с целью ослабления и разработки почвенного профиля перед посевом.

Конструкционная сталь – сталь, которая применяется для изготовления различных деталей, механизмов и конструкций в машиностроении и строительстве и обладает определёнными механическими, физическими и химическими свойствами.

Углеродистая сталь – сталь с повышенным содержанием углерода и отсутствием легирующих элементов.

Испытание продукции – экспериментальное определение качественных или количественных характеристик свойств испытуемого объекта.

Трибологические испытания – это исследования объектов на трение и износ.

Экспериментальный образец – образец изделия, обладающий основными характеристиками намечаемого к разработке изделия и предназначенный для проверки предполагаемых технических решений и уточнения отдельных характеристик.

Износостойкость – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определённых условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания.

Изнашивающая способность почвы – способность почвы изнашивать режущие элементы, изменять их геометрические размеры в результате режущего или скользящего воздействия составляющих почву частиц и включений.

Линейный износ – изменение размера изделия в направлении, перпендикулярном поверхности, подвергавшейся износу.

Коррозия – процесс самопроизвольного разрушения металлов и их сплавов под влиянием внешней среды.

Коррозионная стойкость – способность материалов сопротивляться коррозии, определяющаяся скоростью коррозии в данных условиях.

Коррозионно-активная среда – среда, приводящая к ускорению процессов разрушения изделия за счёт коррозии.

Ударная вязкость металла – способность материала поглощать кинетическую энергию в процессе деформации и разрушения под действием ударной нагрузки.

Трещиностойкость – способность материала сопротивляться развитию

трещин при механических, термических и других воздействиях.

Натурные испытания – испытания объекта в условиях, которые соответствуют условиям его эксплуатации с непосредственным оцениванием и контролем определяемых характеристик объекта.

Абразивный износ – механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия на него абразивных частиц.

Пластическая деформация – смещение одних слоев металла относительно других по линиям скольжения, образующимся по дислокациям.

Твердость металла – одна из ключевых механических характеристик, определяющих его способность сопротивляться деформации под воздействием внешних сил и отражает его способность противостоять истиранию, царапинам, вмятинам и проколам.

Конструкционная прочность – комплекс механических свойств, обеспечивающих надёжную и длительную работу материала в условиях эксплуатации.

Долговечность – свойство изделия сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

Предел прочности – размер силовой нагрузки, при которой металл разрушается.

Предел текучести – размер силовой нагрузки, при которой металл начинает деформироваться.

Технологичность материалов – совокупность свойств, обеспечивающая возможность изготовления изделий с заданным качеством при минимальных затратах.

Работоспособность – состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданную функцию с параметрами, установленными требованиями технической документации.

Эксплуатационный ресурс – период безотказной работы.

Наработка до отказа – наработка объекта от начала его эксплуатации или от момента его восстановления до отказа.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

МТА	– Машинно-тракторные агрегаты
ПО	– Плазменная обработка
СТ РК	– Национальный стандарт Республики Казахстан
ГОСТ	– Межгосударственный стандарт
УМЗ	– Ультрамелкозернистая (структура)
СУМЗ	– Субультрамелкозернистая (структура)
ЭПО	– Электролитно-плазменная обработка
ПЛН	– Плуг лемешный навесной
НПК	– Научно-производственная компания
FMEA	– Failure Modes and Effects Analysis
SPC	– Statistical Process Control
σ_b	– временное сопротивление, МПа
σ_T	– предел текучести, МПа
$\sigma_{0,2}$	– предел пропорциональности, МПа
ψ	– относительное сужение, %
δ	– относительное удлинение, %
λ	– относительная длина трещины
KCU	– ударная вязкость, Дж/см ²
A_p	– работа разрушения, Дж
F	– площадь живого сечения образца, м ²
HB	– твердость по Бринеллю
HV	– твердость по Виккерсу
HRC	– твердость по Роквеллу
M_3	– мартенсит закалки
M_b	– мартенсит бесструктурный
t	– температура нагрева, °C
$V_{охл}$	– скорость охлаждения образцов, °C/с
Δ	– межпластинчатое расстояние, мм
I_d	– ток сжатой дуги, А
U_d	– напряжение сжатой дуги, В
q	– мощность дуги, Вт
d_c	– диаметр сопла, мм
S	– расстояние между соплом и изделием, мм
h	– глубина закаленной зоны, мм
b	– ширина закаленной зоны, мм
$G_{п.г.}$	– расход плазмообразующего газа, м ³ /с
R_a	– параметр шероховатости, мкм
v_k	– скорость коррозии, г/м ² ·ч
Δm_{cp}	– среднее значение массы изменения металла, г

ВВЕДЕНИЕ

В условиях устойчивого экономического роста и индустриально-инновационного развития Республики Казахстан особое значение приобретает повышение эффективности агропромышленного комплекса (АПК), как одного из ключевых секторов национальной экономики. Согласно стратегическим документам, в том числе Концепции развития агропромышленного комплекса Республики Казахстан на 2021-2030 годы и Комплексному плану по развитию машиностроительной отрасли на 2024–2028 годы, приоритетом является внедрение высокоэффективных, ресурсосберегающих и инновационных технологий, способствующих росту производительности труда и снижению себестоимости сельскохозяйственной продукции [1, 2].

Одним из важнейших направлений повышения эффективности сельхозпроизводства является улучшение эксплуатационных характеристик рабочих органов сельскохозяйственной техники. Износ этих деталей ведёт не только к снижению качества обработки почвы, но и к увеличению затрат на ремонт, обслуживание, простоя машин и, как следствие, к удорожанию производимого сырья [3].

Специфика Казахстана, с его масштабной промышленной и сельскохозяйственной деятельностью, а также значительной развитостью сельскохозяйственного транспорта, акцентирует внимание на необходимость усовершенствования и повышения долговечности технических деталей. Улучшение качества поверхностного слоя деталей в соответствии с методами и технологиями, описанными в нормативных документах Республики Казахстан, является одним из приоритетных направлений исследований в данной области [4].

Сельскохозяйственная промышленность Республики Казахстан представлена предприятиями, которые оснащены различной техникой: машинно-тракторные агрегаты, посевная, посадочная и уборочная техника, техника для полива и орошения, внесения удобрений.

Наиболее большим ударно-абразивным нагрузкам (400-650 кг на одну деталь), износу и контактно усталостной деформации подвергаются лемеха плугов и лапы культиваторов. Как показывают результаты многочисленных испытаний на долговечность, от 10 до 40% лемехов и лап культиваторов в условиях суглинистых почв выбраковывается из-за изгиба и поломки, не достигнув предельного состояния по износу [5,6]. И, как следствие, дальнейшие простои техники по причине изнашивания или низкой надежности приводят к потерям урожая, дополнительным затратам на восстановление работоспособности. По данным производственной практики и эксплуатационных наблюдений для почв средней плотности (суглинки, супеси) наработка на отказ незакалённых лемехов плуга и лап культиваторов составляет в среднем 720 га на одну деталь, при этом в более абразивных условиях (песчаные почвы с наличием каменистых включений) данный показатель может снижаться до 640-650 га. То есть детали теряют работоспособность уже после наработки около 700 га, тогда как технологически обоснованный ресурс должен

быть в 1,5-2 раза выше. Следовательно, возникает научно-техническая проблема повышения износостойкости и долговечности тяжело-нагруженных деталей при сохранении их работоспособности в условиях переменных нагрузок, которая требует применения эффективных методов поверхностного упрочнения.

В контексте активного развития технологий и повышения требований к надежности и эффективности работы технических систем, вопрос улучшения качества поверхностного слоя тяжело нагруженных деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники является актуальным.

В этой связи особое значение приобретает использование эффективной плазменной закалки для улучшения поверхностного слоя нагруженных деталей без деформации внутреннего слоя металла, обеспечивающих сохранение концентрации углерода в структуре. Данный метод перспективен тем, что дает возможность плавного регулирования в процессе закалки параметров режимов, является практичным, экономичным и производительным.

Отсутствие специализированной нормативно-технической документации, комплексно регламентирующей процессы плазменной закалки конструкционных углеродистых сталей, является одной из существенных причин снижения износостойкости, долговечности и эксплуатационного ресурса тяжело-нагруженных деталей почвообрабатывающих машин. В условиях отсутствия единых требований к параметрам плазменной обработки, режимам нагрева и охлаждения, глубине упрочнённого слоя и структуре поверхностной зоны возрастает вероятность нестабильности технологического процесса и получения неоднородных эксплуатационных характеристик упрочняемых деталей. Решение данной проблемы требует разработки отраслевого стандарта, который мог бы регулировать и обеспечить качество плазменной закалки, в частности лемехов плугов и лап культиваторов из конструкционных углеродистых сталей.

В связи с этим целью данной диссертационной работы является разработка нормативной документации на процессы плазменной закалки путем определения и обоснования оптимальных режимов плазменной закалки.

Для достижения поставленной цели были определены следующие основные задачи:

- анализ существующих методов упрочнения тяжело нагруженных деталей;
- исследование влияния параметров плазменной закалки на микроструктуру и фазовый состав стали марки 65Г;
- построение регрессионной модели влияния режимов плазменной закалки на механические и эксплуатационные свойства тяжело нагруженных деталей из стали 65Г с целью оптимизации технологического процесса;
- оценка эксплуатационных и физико-химических характеристик упрочненных деталей, включающих оценку твердости поверхности, глубины упрочнённого слоя, износостойкости, ударной вязкости и коррозионной стойкости;
- исследование и оценка распределения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей после плазменной закалки;

- разработка нормативно-технической документации на технологический процесс плазменной закалки изделий из углеродистых конструкционных сталей;
- оценка ожидаемой экономической эффективности от внедрения технологии плазменной закалки.

Объект исследования – процессы плазменной закалки лемехов плуга и стрелчатых лап культиватора.

Предмет исследования – Влияние режимов плазменной закалки на эксплуатационные и физико-механические свойства и структуру упрочненного слоя лемеха плуга и стрелчатой лапы культиватора.

Научная новизна:

1. Разработаны оптимальные режимы плазменной закалки лемеха плуга и лапы культиватора, обеспечивающих формирование слоя с повышенными износостойкостью и физико-механическими характеристиками.

2. Определено влияние основных режимов закалки (сила тока, напряжение дуги, расстояние от горелки до поверхности, а также скорость перемещение горелки) на формирование упрочненного слоя. На основе регрессионного анализа установлены закономерности межфакторного взаимодействия варьируемых параметров режима плазменной закалки, при этом твердость поверхности определена как наиболее значимый отклик, характеризующий эффективность процесса упрочнения.

3. Исследованы закономерности формирования и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое стали 65Г после плазменной закалки, установлено образование градиентного поля сжимающих напряжений величиной до 353-440 МПа в приповерхностной зоне, способствующих повышению трещиностойкости и эксплуатационной долговечности лемехов плугов.

4. Разработана технологическая инструкция по плазменной закалке лемехов плугов (Приложение В).

5. Разработан стандарт организации СТО ТОО 190740006823-01-2026 «Плазменная закалка изделий из углеродистых конструкционных сталей» (Приложение Г).

Практическая значимость работы.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности применения оптимизированных режимов плазменной закалки для упрочнения тяжело-нагруженных деталей почвообрабатывающих машин, что позволяет повысить срок службы и износостойкость рабочих органов сельскохозяйственной техники. Разработанные технологические рекомендации могут быть использованы предприятиями сельского хозяйства, производителями почвообрабатывающей техники, а также сервисными и ремонтными центрами.

Показана возможность повышения износостойкости и долговечности тяжело-нагруженных деталей почвообрабатывающих машин методом плазменной обработки. С этой целью совместно с ТОО «Нур 777 КАС» (Северо-Казахстанская область, Аккайынский район) проведены полевые испытания, подтвердившие эффективность предложенных режимов плазменной обработки.

Результаты диссертационной работы внедрены в деятельность ТОО «МехТехСервис» (г. Кокшетау) (Приложение А).

Связь диссертации с другими научно-исследовательскими работами.

Диссертация выполнена по бюджетной программе в рамках грантового финансирования проектов по теме: АР26104483 «Исследование и разработка градиентного упрочнения цельнокатаных железнодорожных колес плазменной закалкой», номер госрегистрации 0125РК00546 (Приложение Е).

Основные положения, выносимые на защиту:

- научное обоснование влияния плазменной закалки на структуру и свойства тяжело нагруженных деталей;
- разработка оптимальных технологических режимов плазменной закалки тяжело нагруженных деталей сельскохозяйственной техники;
- технологическая инструкция плазменного упрочнения лемехов плугов;
- стандарт организации на плазменную закалку конструкционных углеродистых сталей.

Экономическая и производственная эффективность метода плазменной закалки для улучшения качества тяжело нагруженных деталей сельскохозяйственной техники, путем увеличения их износостойкости.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации доложены и обсуждены на международных научно-практических конференциях:

- 12-й международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения» (Астана, 2024 – 14 марта);
- 83-й международной научно-практической конференции «Научный форум: технические и физико-математические науки» (Москва, 2025 – 14 апреля, получен Сертификат);
- 95-й международной научно-практической конференции «Технические науки: проблемы и решения» (Москва, 2025 – 22 апреля).

Публикации.

По материалам диссертационных исследований опубликовано 12 работ, из них 3 статьи в международных научных изданиях, входящих в базу данных Scopus, 3 статьи в научных изданиях, рекомендуемых КОКСОН Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан для публикации основных результатов научной деятельности, 1 монография, 3 публикации в материалах международных научно-практических конференций, в том числе 1 статья в материалах зарубежных конференций, 1 статья в других изданиях. Получен 1 патент на полезную модель Республики Казахстан (Приложение Б).

Личный вклад диссертанта. Диссертант принимал непосредственное участие в обсуждении и постановке задачи и анализе результатов. Все экспериментальные результаты, включенные в диссертацию, получены либо самим диссертантом, либо при его непосредственном участии. 18 февраля 2020 года было подписано Соглашение о научном сотрудничестве между НАО «Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина и ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет (Приложение Д).

Структура и объем диссертации: Диссертация изложена на 144 страницах машинописного текста, включая 45 рисунков и 34 таблиц. Состоит из содержания, списка обозначений и сокращений, введения, пяти разделов, заключения, списка использованных источников в количестве 157 наименований.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Основные виды износа и причины преждевременного выхода из строя рабочих органов при обработке почвы различного механического состава

Рабочие органы почвообрабатывающих машин подвергаются интенсивному износу в процессе эксплуатации, что приводит к снижению их эффективности и преждевременному выходу из строя. Особенности износа зависят от механического состава обрабатываемой почвы, а также от конструктивных и эксплуатационных факторов [7, 8]. Причинами преждевременного выхода из строя могут быть: низкая износостойкость материалов, неправильный выбор технологии упрочнения, применение неэффективных методов упрочнения и т.п. Изменение формы и размеров рабочих органов в процессе эксплуатации, например, затупление лезвий, приводит к снижению их эффективности и преждевременному выходу из строя [9].

К числу основных механизмов изнашивания рабочих органов относятся абразивный, адгезионный, ударный и коррозионный виды износа [10]. Наибольшее отрицательное воздействие на быстроизнашивающиеся элементы оказывает абразивное изнашивание, вызванное присутствием в почве природных абразивных включений, прежде всего частиц SiO_2 , обладающих высокой твердостью (до 10 000 HV). Избавиться от них практически невозможно, можно только замедлить процесс изнашивания, используя различные методы упрочнения и, что более эффективно, применяя материалы с высокой твердостью, желательнее превышающие твердость абразива [11]. Абразивный износ обусловлен взаимодействием твёрдых включений почвы, таких как песок и мелкие каменистые фракции, с поверхностью рабочих органов. При эксплуатации на песчаных и супесчаных почвах режущая кромка лемеха подвергается наиболее интенсивному изнашиванию, что сопровождается образованием продольных борозд и фасок, затуплением лезвия и снижением эффективности обработки почвы. Аналогичный характер износа наблюдается и у стрелчатых лап культиваторов, для которых песчаные почвы являются наиболее неблагоприятными условиями эксплуатации [12]. По мере увеличения связности почвы интенсивность изнашивания уменьшается в следующей последовательности: супесчаные, суглинистые, глинистые и тяжелоглинистые почвы. Зоны износа лемеха представлены на рисунке 1.

По интенсивности нарастания износа лемех можно разделить на три зоны (рисунок 1): носовую часть (Зона I), лезвие (Зона II), среднюю часть и пятку (Зона III). Экспериментальные данные показывают, что наибольшие потери лемехов по массе и толщине металла наблюдаются на песчаных почвах; несколько меньшая интенсивность изнашивания характерна для условий тяжёлых супесей, тогда как на суглинистых почвах данный процесс протекает более медленно [13, 14]. Для эксплуатации на песчаных и супесчаных грунтах типичным видом повреждения является сквозное истирание носовой части лемеха, формирующее продольную

желобообразную канавку, распространяющуюся от режущей кромки до спинки в направлении перемещения абразивных частиц.

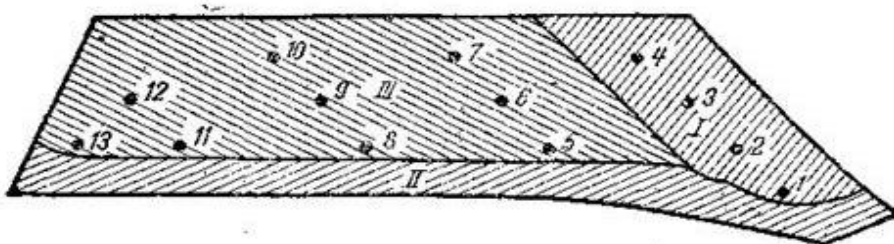


Рисунок 1 – Зоны износа лемеха

При работе на глинистых и суглинистых почвах режущая кромка лемеха характеризуется ускоренным притуплением, сопровождающимся формированием затылочной фаски. Для оценки долговечности отвалов в качестве показателей могут использоваться как потеря массы материала, так и величина линейного износа [15].

С учётом интенсивности изнашивания конструктивные участки лапы культиватора также условно классифицируются на три зоны (рисунок 2): входная (Зона I), рабочая (Зона II) и выходная (Зона III).

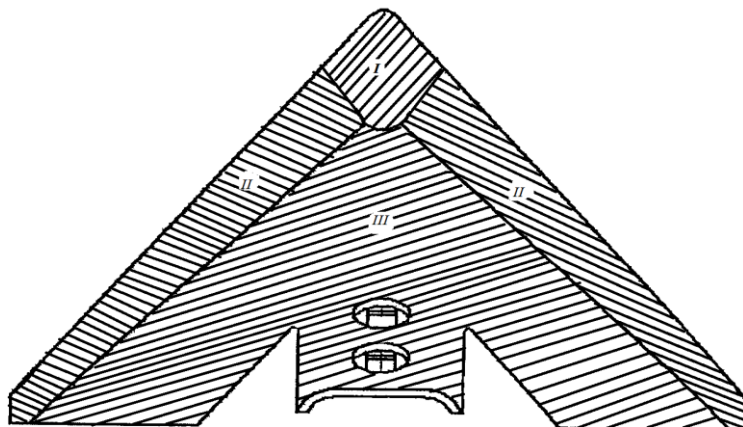


Рисунок 2 – Зоны износа лапы культиватора

Входная зона рабочего органа (зона I) первой взаимодействует с почвенной средой и, вследствие этого, подвергается наиболее выраженному абразивному воздействию. При повышенных скоростях обработки и наличии в грунте твёрдых минеральных включений, таких как песок и мелкие каменистые фракции, интенсивность изнашивания в данной зоне достигает максимальных значений. Поверхность металла при этом приобретает характерный микрорельеф, включающий следы резания, микроцарапины и локальные микроотколы.

Рабочий участок режущей кромки (зона II), формирующий основной профиль обработки почвы, изнашивается более стабильно и равномерно. В данной зоне на характер износа влияет не только механическое взаимодействие

с грунтом, но и термические воздействия, обусловленные периодическим нагревом и охлаждением металла.

Выходной участок (зона III) испытывает наименьшую механическую нагрузку, поскольку значительная часть энергии взаимодействия с почвой рассеивается на предыдущих стадиях контакта. Вместе с тем в этой зоне возможно развитие коррозионных процессов, особенно при работе во влажных или химически агрессивных почвах. Хотя интенсивность изнашивания здесь минимальна, при длительной эксплуатации может наблюдаться отслоение упрочнённого слоя, связанное с недостаточной адгезией покрытия либо неоднородностью структуры металла после плазменной закалки [16].

При эксплуатации на песчаных и супесчаных почвах, характеризующихся высоким содержанием твёрдых минеральных частиц (более 70%), доминирующим механизмом разрушения является абразивный износ. Он проявляется в виде продольного желобообразного истирания носовой части лапы по направлению движения почвенной массы. Высокая подвижность и угловатая форма частиц способствуют формированию глубокой выработки от режущего острия к тыльной поверхности, что приводит к снижению прочности и нарушению геометрической устойчивости детали [17].

На тяжёлых суглинистых и глинистых почвах возрастает роль пластической деформации металла в зоне режущей кромки, что сопровождается её притуплением и образованием выраженной затылочной фаски. При продолжительной работе в таких условиях повышается вероятность усталостного разрушения материала в областях концентрации напряжений, прежде всего в зонах изгиба и крепления стойки [18].

Снижение интенсивности изнашивания после достижения максимальных значений происходит быстрее на почвах, обладающих большим изнашивающим воздействием. Это объясняется их меньшей связностью, вследствие чего при увеличении скорости обработки уменьшается фактическая площадь трения абразивных частиц с рабочей поверхностью детали [19].

При незначительных скоростях перемещения рабочего органа, близких к нулевым значениям, почвенный пласт не перемещается по поверхности отвала в режиме скольжения, а испытывает существенные деформации и смещается в боковом направлении под воздействием корпуса плуга. В этих условиях частицы грунта, находящиеся в контакте с рабочей поверхностью, либо сохраняют практически неизменное положение, либо перемещаются относительно неё с минимальной скоростью, что обуславливает низкую интенсивность процессов изнашивания.

В зависимости от эксплуатационных условий почворежущих элементов характер их абразивного изнашивания может меняться, переходя от более интенсивных форм к менее выраженным и наоборот. Изнашивание металла в абразивной среде определяется совокупностью факторов, сопровождающих работу почвообрабатывающих рабочих органов, к которым относятся переменные нагрузки в зоне трения, неоднородность абразивной среды, а также сложность динамики процессов контактирования и перемещения частиц абразива. Существенное влияние оказывают механические свойства материала

детали и абразива, соотношение их твёрдости, скорость относительного движения, а также ряд других параметров. Многофакторность указанных условий приводит к формированию смешанных механизмов изнашивания.

Анализ современных представлений о природе абразивного износа позволяет заключить, что применительно к почворежущим элементам данный процесс в основном реализуется за счёт микрорезания, микроцарапания, хрупкого разрушения, а также одно- или многократного пластического деформирования поверхностных слоёв. Указанные механизмы протекают одновременно и, как правило, сочетаются с коррозионно-механическим разрушением материала рабочих органов [20].

Адгезионный износ появляется в результате прилипания частиц почвы к поверхности рабочих органов, что со временем приводит к нарушению целостности и разрушению поверхностного слоя. Повышенная влажность грунта существенно усиливает адгезионный износ, особенно при обработке глинистых и суглинистых почв, для которых характерна высокая склонность к прилипанию частиц почвы к рабочим органам.

Ударный характер изнашивания имеет место при взаимодействии рабочих органов с твёрдыми включениями, присутствующими в почве, такими как камни или корневые остатки растений. Эксплуатация на грубоструктурных почвах с повышенным содержанием крупных фракций сопровождается возникновением ударных нагрузок, способствующих ускоренному разрушению элементов почвообрабатывающих машин [21].

Коррозионное разрушение рабочих органов почвообрабатывающих машин носит комплексный характер и обусловлено одновременным действием механических нагрузок и электрохимических процессов, протекающих в агрессивной почвенной среде. Установлено, что порядка 70-80% отказов деталей сельскохозяйственной техники связано с совместным действием коррозионных процессов и механического изнашивания. В отличие от механического воздействия, в данном случае деградация поверхностного слоя металла происходит не только вследствие трения, но и под воздействием химически активных соединений, присутствующих в составе грунта [22]. Коррозионная активность почв определяется совокупностью факторов, среди которых ключевыми являются влажность, кислотность (рН), степень аэрации, гранулометрический и химический состав, а также пористость и электропроводность. Разделение почв по уровню коррозионной агрессивности на высоко-, средне- и слабоагрессивные имеет существенное практическое значение при прогнозировании долговечности оборудования и выборе эффективных защитных мер [23].

В современных условиях сельскохозяйственные почвы нередко содержат значительные концентрации агрохимических веществ, включая минеральные удобрения азотной, фосфорной и калийной групп, а также остаточные количества гербицидов, пестицидов и органических соединений. При повышенной влажности и воздействии температурных колебаний данные компоненты формируют электролитическую среду, способствующую

интенсификации электрохимических процессов коррозии металлических деталей [24].

Отличительной особенностью коррозионного изнашивания является его неравномерное распределение по поверхности рабочего органа. Наиболее интенсивное разрушение наблюдается в зонах локальных дефектов, микротрещин и концентрации напряжений, а также в участках, где создаются условия для накопления влаги и агрессивных почвенных компонентов. Так, у лемехов плугов и лап культиваторов повышенной коррозионной опасности подвержены участки сопряжения режущей кромки с корпусом, внутренняя поверхность полевого обреза, а также зоны с нарушенным защитным слоем, образовавшиеся в результате предыдущих ремонтов или упрочняющих операций [25].

Существенное влияние на характер и интенсивность изнашивания рабочих органов оказывает механический состав почвы. Физико-механические свойства грунта во многом определяются размером и содержанием твёрдых частиц в его структуре. По размерному признаку твердые включения подразделяются на каменистые фракции с размером частиц более 1 мм и мелкозем, включающий частицы размером менее 1 мм [26].

Для классификации почв по механическому составу твердые частицы мелкозема условно разделяют на две размерные фракции: физический песок (частицы диаметром более 0,01 мм) и физическую глину (частицы диаметром менее 0,01 мм) (таблица 1).

Таблица 1 – Соотношение песка и глины в различных песках

Тип почвы по механическому составу	Содержание глины (частицы < 0,01 мм), %	Содержание песка (частицы 0,01–1 мм), %
Песок рыхлый	0–5	95–100
Песок связный	5–10	90–95
Супесь	10–20	80–90
Суглинок легкий	20–30	70–80
Суглинок средний	30–40	60–70
Суглинок тяжелый	40–50	50–60
Глина легкая	50–65	35–50
Глина средняя	65–80	20–35
Глина тяжелая	>80	<20

В основу классификации почв по механическому составу положено соотношение песка и глины. Почвы с высоким содержанием глинистых частиц при обработке требуют больших энергетических затрат, поэтому их называют тяжелыми. Почвы с высоким содержанием песчаных частиц относятся к легким. Лучшими по механическому составу считаются суглинистые и супесчаные почвы с содержанием глинистых частиц (частицы размером менее 0,01 мм) от 10 до 40% [27].

Каменистые включения различают в зависимости от диаметра камней, а почвы - по степени содержания камней в почве (таблица 2)

Таблица 2 – Классификация каменистых включений в зависимости от их диаметра

Вид каменистого включения	Диаметр включения, мм
Крупный песок	1-3
Хрящ:	
мелкий	3-5
крупный	5-10
Щебень:	
мелкий	10-30
средний	30-50
крупный	50-100
Камни	100 и более

Классификация почв по степени в них камней представлена в таблице 3

Таблица 3 – Классификация почв по степени каменистости

Категория каменистости почвы	Содержание каменистых включений, %	Характеристика
Некаменистая	до 0,3	Каменистые включения отсутствуют или встречаются в следовых количествах, не оказывая влияния на агрофизические свойства почвы.
Слабокаменистая	0,3–5,0	Содержание обломочного материала незначительно; влияние на водный и воздушный режимы почвы минимально.
Среднекаменистая	5,1–10,0	Присутствие каменистых фрагментов может оказывать умеренное влияние на физико-механические свойства почвы и технологичность её обработки.
Сильнокаменистая	более 10,0	Значительное количество каменистых включений существенно ухудшает агротехнические свойства почвы и затрудняет проведение сельскохозяйственных и строительных работ

В структурном состоянии твердые частицы соединяются водопрочные агрегаты (комочки) различного размера: микроагрегаты (частицы меньше 0.25 мм) и макроагрегаты (частицы больше 0.25 мм) [28]. Для бесструктурных почв характерно отсутствие водоустойчивых агрегатов, при этом отдельные твердые частицы образуют плотную однородную массу. При обработке тяжелых глинистых грунтов режущая кромка лемеха интенсивно притупляется и, как правило, приобретает закругленную форму.

Исследования износа лемехов показывают, что при формировании на лезвии фаски шириной около 2 мм дальнейшая эксплуатация при обработке твердых почв становится нецелесообразной без проведения заточки. Наблюдения также свидетельствуют о том, что увеличение ширины фаски до 3–4 мм сопровождается ростом тягового сопротивления примерно на 25% и увеличением расхода топлива до 60%. При работе на тяжелых суглинистых

почвах на лемехе формируется затылочная фаска с углом порядка 30° , при этом образование передней фаски, как правило, не наблюдается.

Согласно данным, приведенным в работах [29, 30], при резании песчаных почв режущая кромка лезвия, как правило, сохраняет работоспособность вплоть до достижения предельного износа. Аналогичный характер изнашивания присущ почворежущему профилю оборотных рыхлительных лап чизельных культиваторов и долот плугов. Для указанных деталей конструктивно предусматривается запас износа почворежущего профиля до предельного состояния, составляющий соответственно 70 мм для лап и 120 мм для долот. Вместе с тем наработка серийно выпускаемых лемехов, долот плугов и оборотных рыхлительных лап чизельных культиваторов существенно снижается при эксплуатации на песчаных и супесчаных почвах, содержащих гравийные включения, что обусловлено высокой абразивной способностью данных типов грунтов [31].

Анализ причин утраты работоспособности серийно выпускаемых почворежущих элементов, их фактической наработки до предельного состояния и сопоставление с требуемыми показателями средней сезонной наработки указывают на сравнительно невысокий технический уровень отечественных изделий. Это обуславливает необходимость разработки и внедрения новых технических решений, направленных на увеличение их эксплуатационного ресурса в 2–4 раза. В связи с этим возникает потребность в теоретическом обосновании применения поверхностной плазменной обработки почворежущего профиля сменных деталей и определении ее оптимальных параметров, обеспечивающих повышение ресурса не менее чем в два раза.

Предлагаемая технология повышения износостойкости сменных деталей рабочих органов почвообрабатывающих машин, основанная на применении поверхностной плазменной обработки конструкционных сталей общего назначения, отличается высокой производительностью, экологической безопасностью и экономической целесообразностью [32].

Переходя от анализа причин изнашивания к практическим аспектам повышения показателей качества тяжело нагруженных деталей почворежущих машин, особое внимание уделено рассмотрению ключевых вопросов управления качеством процессов плазменной обработки как эффективного инструмента ресурсосбережения в агропромышленном комплексе.

Переходя от анализа причин износа к практическим вопросам повышения показателей качества тяжело-нагруженных деталей почворежущих машин, рассмотрены ключевые аспекты управления качеством процессов плазменной обработки как инструмента ресурсосбережения в аграрной отрасли.

1.2 Теоретический анализ процесса плазменной обработки

Плазменная обработка металлов представляет собой высокоэнергетический термофизический процесс, основанный на воздействии ионизированной газовой среды на поверхность материала с целью изменения его структуры и эксплуатационных свойств. Плазма как особое состояние вещества включает в себя электроны, ионы и нейтральные частицы, обладающие высокой

энергией, что обеспечивает интенсивный перенос тепла к обрабатываемой поверхности. В условиях плазменной обработки температура электронов достигает 8000–25000 К, температура тяжёлых частиц составляет порядка 3000–15000 К, тогда как температура поверхности металла в процессе плазменной закалки находится в диапазоне 900–1400°С, что соответствует области аустенитизации сталей и позволяет реализовать фазовые превращения без доведения материала до плавления.

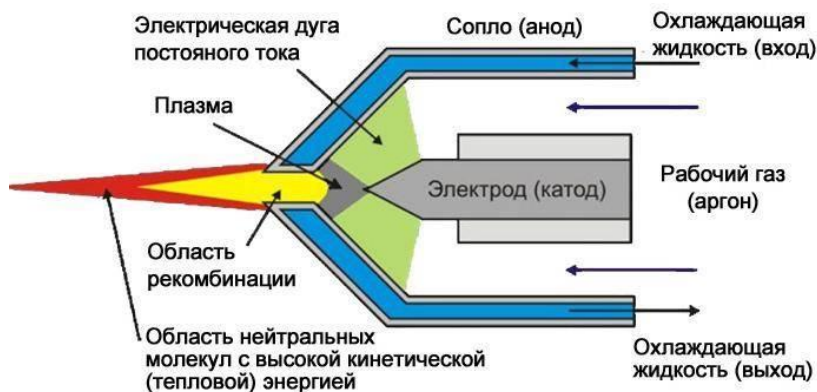


Рисунок 3 – Схема плазматрона постоянного тока

На рисунке 3 представлена принципиальная схема плазматрона постоянного тока, иллюстрирующая процессы генерации и формирования плазменной струи. Конструкция включает катод, анод (сопло), канал подачи рабочего газа и систему охлаждения, обеспечивающую тепловую устойчивость устройства.

Внутри плазматрона между катодом и анодом формируется электрическая дуга постоянного тока, которая является основным источником энергии для ионизации газа. Типичные параметры дуги составляют: сила тока 100–300 А, напряжение 50–150 В, при этом мощность дуги может достигать 5–30 кВт. При подаче рабочего газа (аргон) в межэлектродное пространство происходит его нагрев и ионизация под действием высокой температуры дуги. В результате газ переходит в плазменное состояние, характеризующееся высокой концентрацией заряженных частиц и значительной температурой.

Катод выполняет функцию эмиттера электронов, которые ускоряются в электрическом поле и движутся к аноду. Скорость движения электронов может достигать значений порядка 10^5 – 10^6 м/с. При этом происходит передача энергии рабочему газу за счёт столкновений электронов с атомами газа, что приводит к их возбуждению и ионизации. Анод, выполненный в виде сопла, формирует направленный поток плазмы, обеспечивая её ускорение и фокусировку.

В области сопла происходит сжатие плазменного потока, что приводит к увеличению скорости истечения до 500–1500 м/с и повышению плотности энергии струи до 10^6 – 10^8 Вт/м². Геометрия сопла играет ключевую роль в формировании параметров плазмы, включая температуру, скорость и степень ионизации. На выходе из сопла формируется узконаправленная плазменная струя, обладающая высокой тепловой и кинетической энергией.

Физическая природа процесса определяется передачей энергии от плазменной струи к поверхности металла, которая количественно описывается выражением теплового потока:

$$q = \alpha(T_p - T_s) \quad (1)$$

где q – плотность теплового потока;

α – коэффициент теплоотдачи;

T_p – температура плазмы;

T_s – температура поверхности материала.

В реальных условиях плотность теплового потока достигает величин порядка 10^6 – 10^8 Вт/м², что обуславливает сверхбыстрый нагрев поверхности с характерными скоростями до 10^3 – 10^5 °С/с. При этом формируется резкий температурный градиент, обеспечивающий локальный нагрев без существенного влияния на объём детали.

Распределение температуры в материале и динамика нагрева описываются нестационарным уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

где $T(x,t)$ – температура как функция координат и времени;

α – коэффициент теплопроводности материала.

На границе раздела плазмы и твёрдого тела выполняется условие теплового баланса:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала.

В результате действия интенсивного теплового потока происходит быстрый нагрев поверхностного слоя до аустенитного состояния, при этом длительность воздействия составляет доли секунды, что ограничивает развитие диффузионных процессов и приводит к формированию неравновесной структуры.

После прекращения воздействия плазменной струи начинается стадия интенсивного охлаждения, обусловленного теплопроводностью материала и отводом тепла вглубь детали. Скорость охлаждения достигает 10^2 – 10^4 °С/с, что приводит к реализации бездиффузионного мартенситного превращения $\gamma \rightarrow M$. Где аустенит γ трансформируется в мартенсит M . Этот процесс сопровождается изменением объёма кристаллической решётки и формированием внутренних напряжений, что существенно влияет на механические свойства обработанного слоя.

Глубина упрочнённого слоя определяется кинетикой теплопереноса и может быть оценена зависимостью:

$$h = 2\sqrt{at} \quad (4)$$

где h – глубина упрочнения;
 a – температуропроводность;
 t – время воздействия.

В условиях плазменной обработки эта величина обычно составляет от 0,5 до 3 мм. Формирование упрочнённого слоя сопровождается развитием градиентной структуры, включающей поверхностный мартенситный слой, переходную зону и основной металл с исходной структурой.

Энергетическое взаимодействие плазмы с поверхностью носит комплексный характер и может быть представлено в виде суммы различных механизмов теплопередачи:

$$q = q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}} + q_{\text{ion}} \quad (5)$$

где учитываются конвективный перенос, тепловое излучение и вклад энергии ионной бомбардировки. Такое сочетание механизмов обеспечивает высокую эффективность передачи энергии и локализацию теплового воздействия.

Изменение механических свойств материала в результате плазменной обработки может быть описано через зависимость твёрдости от доли мартенситной фазы:

$$HV = HV_0 + k \times f_M \quad (6)$$

где HV – итоговая твёрдость;
 HV_0 – исходная твёрдость материала;
 f_M – доля мартенсита;

k – коэффициент упрочнения. В результате обработки твёрдость может увеличиваться в несколько раз, что приводит к значительному повышению износостойкости и эксплуатационного ресурса деталей.

Таким образом, плазменная обработка представляет собой сложный неравновесный процесс, в котором реализуются высокие температуры, экстремальные скорости нагрева и охлаждения, а также специфические механизмы фазовых превращений. Совокупность этих факторов обеспечивает формирование упрочнённого поверхностного слоя с высокой твёрдостью, износостойкостью и стабильными эксплуатационными характеристиками при сохранении пластичности основного материала.

1.3 Вопросы управления качеством процесса упрочнения тяжело-нагруженных деталей сельскохозяйственной техники плазменной закалкой

Сельское хозяйство играет ключевую роль в экономике Казахстана, обеспечивая продовольственную безопасность, развитие регионов и экспортный потенциал страны. Казахстан является одним из мировых лидеров по экспорту зерновых, особенно пшеницы и муки. Эта отрасль хозяйства создает рабочие

места, особенно в сельской местности, где занято около 20% трудоспособного населения.

Аграрный сектор способствует развитию сельских территорий, созданию инфраструктуры и улучшению качества жизни в регионах. Казахстан экспортирует сельхозпродукцию более чем в 70 стран мира. Развитие сельского хозяйства снижает зависимость от импортных продуктов и обеспечивает стабильность продовольственного рынка.

В условиях интенсификации аграрного производства и ужесточения требований к ресурсоэффективности, долговечности и эксплуатационной надёжности почвообрабатывающей техники возрастает значимость обеспечения высокого качества тяжело нагруженных рабочих органов, к которым относятся лемехи, долота, культиваторные лапы и чизели. Одним из наиболее перспективных способов термического упрочнения данных элементов является плазменная закалка, применение которой позволяет существенно повысить твёрдость, износостойкость и срок службы деталей, особенно при эксплуатации в абразивно-влажных почвенных средах [33].

С учётом устойчивого спроса на износостойкие изделия в агропромышленном комплексе особую актуальность приобретает задача не только обеспечения стабильности механических и эксплуатационных свойств деталей, но и их соответствия современным требованиям надёжности, ремонтпригодности и экономической целесообразности. В условиях рыночной конкуренции определяющим фактором становится способность производителей выходить за рамки формального соблюдения нормативных требований, последовательно совершенствуя конструктивные решения и технологии термической обработки изделий [34].

Анализ мирового опыта повышения ресурса рабочих органов сельскохозяйственных машин свидетельствует о снижении результативности традиционных подходов к контролю качества, основанных преимущественно на инспекционных методах. В промышленно развитых странах всё более широкое распространение получают системы проактивного управления качеством, охватывающие все этапы жизненного цикла детали – от проектирования геометрии и выбора материалов до разработки технологий плазменной закалки и организации производственных процессов. Реализация такого комплексного подхода обеспечивает устойчивое повышение качества продукции [35, 36].

Традиционные методы упрочнения, включая цементацию и индукционную закалку, не всегда позволяют обеспечить требуемую стойкость деталей к высоким механическим и абразивным нагрузкам. Аналогично стандартные износостойкие покрытия, в том числе борированные и нитроцементированные слои, могут оказаться недостаточно эффективными при эксплуатации в условиях интенсивного абразивного воздействия.

Использование плазменной закалки в составе управляемого технологического процесса упрочнения рабочих органов создаёт предпосылки для формирования оптимальной структуры закалённого слоя с градиентным распределением твёрдости, минимальными деформациями основного металла и повышенной термической стабильностью. Данное обстоятельство приобретает

особую значимость при эксплуатации техники в сложных почвенно-климатических условиях Казахстана и других регионов с континентальным климатом, где сочетание интенсивного абразивного износа и переменных температурно-влажностных режимов формирует экстремальные условия работы оборудования.

В связи с этим первостепенное значение приобретает не только дальнейшее совершенствование технологии плазменной закалки, но и обеспечение устойчивости качества готовой продукции. Таким образом, задачи повышения качества изделий напрямую связаны с разработкой и внедрением эффективных систем управления качеством продукции.

В трудах исследователей, включая Ф. Тейлора, Э. Деминга, Дж. Джурана, А. Фейгенбаума, Ф. Кросби, К. Исикаву, Г. Тагути, А. Маслоу, а также российских учёных Г.Г. Азгальдова, В.В. Квятковского, А.И. Березина, В.Н. Шапиро, В.П. Сергеева и А.В. Гличева, последовательно раскрываются принципы, методы и инструменты управления качеством продукции, направленные на повышение её конкурентоспособности, надёжности и удовлетворённости потребителя. Особое внимание в этих подходах уделяется предотвращению дефектов и снижению рисков на ранних стадиях жизненного цикла изделия [37, 38].

Одним из таких инструментов является метод анализа видов и последствий потенциальных отказов (FMEA, от англ. Failure Modes and Effects Analysis). FMEA анализ представляет собой один из наиболее эффективных инструментов управления качеством и риска на этапах проектирования, производства и эксплуатации техники [39]. Его применение особенно обосновано в отношении тяжело нагруженных деталей почвообрабатывающих машин, таких как лемехи плугов, лапы культиватора, которые, учитывая критичность рабочих органов к износу и эксплуатационным нагрузкам, функционируют в условиях интенсивного абразивного износа (скорость съёма металла в зоне контакта с почвой может достигать 0,02–0,05 мм/га), ударных нагрузок, переменных температурных воздействий и вибрации. Полевая практика показывает, что ресурс незакалённых лемехов и лап составляет 700 га, тогда как закалённые или упрочнённые детали могут эксплуатироваться до 900-1000 га, то есть в 1,2 раза дольше.

В этом контексте особенно значимым инструментом выступает метод FMEA, позволяющий провести превентивную оценку рисков и слабых мест в конструкции и технологии изготовления до применения плазменной обработки [40]. Это особенно актуально при проектировании или запуске в производство новых серий изделий. Метод FMEA-анализа к незакалённым деталям позволяет: выявить наиболее вероятные режимы; оценить критичность отказов по трём параметрам RPN (Risk Priority Number): тяжесть последствий, частота возникновения и обнаруживаемость.

Методом FMEA-анализа были выявлены потенциальные отказы и последствия незакалённых тяжело-нагруженных рабочих органов почвообрабатывающих машин, в частности лемехов плуга и лап культиватора, изготовленных из стали 65Г (таблицы 4, 5).

Таблица 4 – Потенциальные отказы, последствия и рекомендации по снижению рисков лемехов плуга

Потенциальный отказ	Причина отказа	Последствия отказа	Частота возникновения (1–10), балл	Тяжесть последствий (1–10), балл	Обнаруживаемость (1–10), балл	RPN, балл	Рекомендации по снижению риска
Затупление лезвия	Износ при контакте с камнями и корнями	Снижение качества обработки почвы	8	6	5	240	Регулярная заточка, использование самозатачивающихся материалов
Трещины и изломы	Усталость материала, ударные нагрузки	Полная потеря функциональности	5	9	4	180	Применение стали 40ХС, применение поверхностной плазменной закалки
Износ носка	Высокие механические нагрузки	Уменьшение глубины обработки	7	7	5	245	Наплавка износостойкими материалами, усиление конструкции
Поверхностные трещины	Низкая прочность поверхностного слоя	Уменьшение срока службы	4	8	6	192	Плазменная закалка деталей

Таблица 5 – Потенциальные отказы, последствия и рекомендации по снижению рисков лап культиваторов

Потенциальный отказ	Причина отказа	Последствия отказа	Частота возникновения (1–10), балл	Тяжесть последствий (1–10), балл	Обнаруживаемость (1–10), балл	RPN, балл	Рекомендации по снижению риска
1	2	3	4	5	6	7	8
Износ режущей кромки	Контакт с камнями, корнями	Снижение эффективности рыхления	8	7	5	280	Внедрение упрочняющих методов поверхностной обработки,

Продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7	8
							Использование самозатачивающихся материалов, регулярная проверка
Деформация стойки	Перегрузка, механические повреждения	Нарушение геометрии и культиватора	4	8	5	160	Применение более прочных материалов, усиление конструкции
Износ втулок и осей	Постоянная нагрузка, трение	Увеличение люфта, нестабильность	7	5	6	210	Регулярная смазка, использование износостойких материалов
Поверхностные трещины	Низкая прочность поверхностного слоя	Уменьшение срока службы	5	7	5	175	Плазменная закалка установкой УДГЗ-200

Приоритетное число риска (RPN) рассчитывается по следующей формуле (7):

$$RPN = S \times O \times D \quad (7)$$

где S (Severity) – тяжесть последствий отказа;

O (Occurrence) – частота возникновения отказа;

D (Detection) – обнаруживаемость.

Критическим значением считается показатель выше 200–250. Высокое RPN требует обязательного принятия мер: изменения конструкции, технологии, усиления контроля или внедрение упрочняющих методов поверхностной обработки.

На основании данных таблицы 4, можно сделать вывод, что наибольший уровень риска для лемеха плуга ($RPN = 245$) связан с износом носка. Данный отказ связан с высокими локальными механическими нагрузками, которые приводят к снижению глубины обработки почвы и, как следствие, к ухудшению качества агротехнического процесса. Без своевременного вмешательства износ носка может вызвать ускоренное разрушение всей рабочей части лемеха.

Средний уровень риска ($RPN=240$) наблюдается по затуплению лезвия, что связано с абразивным износом при контакте с твёрдыми частицами (камни, корни). Это приводит к снижению качества резания и повышенному сопротивлению при вспашке, что увеличивает энергозатраты и снижает

эффективность работы плуга. Несмотря на средний балл серьёзности ($S=6$), высокая вероятность отказа ($V=8$) делает этот риск критичным в долгосрочной перспективе.

Также к среднему риску можно отнести поверхностные трещины ($RPN=192$) – их появление связано с недостаточной прочностью поверхностного слоя. Хотя вероятность возникновения ниже, чем у износа, последствия также значимы, поскольку трещины могут перерасти в разрушение при длительной эксплуатации.

Наименьший риск ($RPN=180$) наблюдается у отказа по типу трещин и изломов вследствие усталости материала, и ударных нагрузок. Несмотря на высокую серьёзность отказа ($S=9$), его вероятность и хорошая обнаруживаемость ($D=4$) делают его контролируемым при должном техобслуживании. Однако важно учитывать, что при прогрессирующем износе и отсутствии замены этот отказ может привести к полной поломке и незапланированному выходу из строя машины.

Рекомендации по снижению риска:

Отказ №1 – использование самозатачивающиеся материалы и наплавку износостойких сплавов; оптимизация угла резания лезвия с целью снижения контактных напряжений; внедрение сменных режущих вставок из твёрдосплавных материалов ($WC-Co$, TiC), что снижает необходимость полной замены лемеха; регламентированная регулярная заточка и визуальный контроль остроты кромки по завершении каждой смены или прохода.

Отказ №3 – использование наплавки износостойких порошков (например, $NiCrBSi$ с добавками WC) с последующим термическим уплотнением или плазменных методов закалки (например, поверхностная плазменная закалка, электролитно-плазменная закалка, плазменная химико-термическая обработка (азотирование, цементация, борирование и др.); геометрическая оптимизация формы носка для более равномерного распределения износа.

Отказ №4 – внедрение неразрушающего контроля (например, капиллярный метод или вихретоковая дефектоскопия) на этапе выпуска и в процессе эксплуатации; разработка периодического осмотра с занесением результатов в электронный журнал технического состояния агрегата; снятие остаточных напряжений после механической обработки (например, виброударной или низкотемпературным отпуском).

Отказ №2 – применение плазменной или индукционной закалки на глубину 1–3 мм с последующим высоким отпуском для снятия внутренних напряжений; применение механического наклёпа или лазерной шлифовки в зонах возможной концентрации напряжений; оптимизация конструкции путём исключения острых переходов в сечении и добавления радиусов сопряжения в зонах максимальных напряжений; Разработка анализов методом конечно-элементного моделирования (FEM) для предсказания зон зарождения трещин и последующей корректировки геометрии.

Исходя из таблицы 5 наибольший риск лап культиваторов ($RPN=280$) приходится на износ режущей кромки, средний риск (Отказы №3 и 4) наблюдается по износу втулок и осей ($RPN=210$), так как их отказ может повлечь

развитие других неисправностей. Наименьший риск (Отказ №2) наблюдается по деформации стойки, но необходимо учитывать, что данный риск может привести к аварийной остановке работы.

Разработаны Рекомендации по снижению риска:

Отказ №1 – использование самозатачивающихся и стойких к абразивному износу материалов; плазменная или лазерная закалка режущей части (глубина 1,5–2 мм, твёрдость > 60 HRC); регулярный визуальный осмотр и измерение износа (например, по шаблонам) каждые 50–100 га; внедрение цифрового мониторинга состояния кромки с использованием камер или датчиков вибрации.

Отказ №2 – усиление конструкции и улучшение геометрии сечения стойки; проведение нормализации и отпуска после сварки/сгибов для снятия остаточных напряжений; внедрение ограничителей глубины обработки и предохранительных элементов (пружинные амортизаторы, срезные болты); регулярный контроль моментов изгиба стойки по контрольным точкам при ремонте и обслуживании.

Отказ №3 – применение высококачественной смазки, твердосплавных втулок; внедрение централизованных смазочных систем с подачей литиевых или молибденовых смазок; Своевременная замена втулок при износе >20% номинального диаметра.

Отказ №4 – использование поверхностной плазменной закали с УДГЗ-200: глубина закали 0,8-1,5 мм, твёрдость слоя – 60-62 HRC; лазерная закалка с динамическим охлаждением, обеспечивающая минимальную деформацию; микроструктурный контроль поверхности после упрочнения с целью выявления зон перегрева.

Проведенный FMEA-анализа до стадии упрочнения позволил: на раннем этапе выявить критичные участки, нуждающиеся в плазменной закалке, усилении или изменении конструкции; оптимизировать геометрию изделия под эксплуатационные нагрузки (включая выбор толщины, формы, радиусов сопряжения); снизить производственные потери, связанные с браком и неэффективной конструкцией, за счёт системного подхода к снижению отказов; обосновать экономическую целесообразность плазменной закали, сравнивая риск отказа незакалённых и упрочнённых деталей по итогам анализа RPN.

Таким образом, применение метода FMEA-анализа рисков отказов рабочих органов почвообрабатывающих машин позволяет систематически выявлять потенциальные риски, оценивать их значимость и разрабатывать эффективные меры по их минимизации. Это способствует повышению надежности и долговечности оборудования, снижению эксплуатационных затрат и улучшению качества обработки почвы.

Плазменная закалка, как инновационная технология поверхностного упрочнения, применяется для повышения износостойкости, усталостной прочности и срока службы режущих и опорных элементов почвообрабатывающей техники. Однако, для достижения устойчивых результатов в условиях массового производства, внедрение даже самых прогрессивных технологий должно сопровождаться системной организацией процессов качества на всех стадиях жизненного цикла изделия.

В этом контексте следует отметить, что начиная с 1987 года были разработаны международные стандарты серии ISO 9000, ставшие основой для построения эффективных систем менеджмента качества [41]. Эти стандарты определяют ключевые принципы, включая ориентацию на потребителя, процессный подход, управление рисками и постоянное улучшение. На их базе сформировались и более комплексные концепции, такие как TQM (Total Quality Management), предполагающая вовлечение всех структурных уровней организации в процессы обеспечения качества, а также методология Six Sigma, направленная на сокращение дефектов и статистических отклонений в технологических и управленческих процедурах [42].

Таким образом, эффективность технологических решений – включая плазменную закалку – значительно возрастает при интеграции их в контекст целостной системы управления качеством, основанной на международных стандартах и передовых управленческих подходах.

Total Quality Management (TQM) – это философия управления, направленная на постоянное улучшение качества продукции, процессов и корпоративной культуры. Основная идея TQM заключается в том, что качество – это ответственность всех сотрудников организации, от руководства до рабочих на производстве [43].

TQM основана на нескольких ключевых принципах:

1. Ориентация на клиента

Качество любой продукции ориентирована на потребителя и определяется потребностями и ожиданиями клиента. Здесь важным является не только характеристики продукции, но и удовлетворенность потребителей.

2. Лидерство руководства

Руководители создают среду, в которой сотрудники мотивированы на улучшение процессов.

3. Вовлечение сотрудников

Каждый работник ответственен и отвечает за качество своей работы. Создаются условия для профессионального роста и мотивации персонала.

4. Процессный подход

Производство и управление являются взаимосвязанными процессами. Улучшение отдельного процесса приводит к повышению общего качества.

5. Непрерывное улучшение

Необходимо проводить постоянный анализ и улучшение процессов, снижение потерь и дефектов. Перспективным является использование статистических методов контроля.

6. Принятие решения на основе данных

Постоянное проведение анализа данных и объективная оценка качества. Применение статистических методов.

7. Взаимовыгодное отношение с поставщиками

Качество компонентов и сырья для производства продукции влияет на его качество. Необходимо выстраивать долгосрочные партнерские отношения с поставщиками.

Рассмотренный метод Total Quality Management (TQM) можно эффективно применять к процессу плазменной закалки для повышения качества, надежности и долговечности тяжелонагруженных деталей сельскохозяйственной техники [44].

Принципы TQM для процесса плазменной закалки при упрочнении тяжелонагруженных деталей почворежущих машин.

В процессе плазменной закалки тяжело-нагруженных деталей почворежущих машин принципы TQM реализуются через комплексное управление качеством на всех стадиях технологического процесса. Ориентация на потребителя выражается в учёте реальных условий эксплуатации почворежущих деталей и требований к их ресурсу, что предусматривает анализ условий работы, сбор данных об отказах и взаимодействие с аграриями для определения оптимальных параметров упрочнения. Это позволяет повысить эксплуатационную пригодность деталей и обеспечить их устойчивость к реальным ударно-абразивным нагрузкам и воздействию различных типов почв:

1. Принцип лидерства руководства реализуется через поддержку инициатив по улучшению качества и внедрение системы постоянного контроля параметров плазменной закалки. Для этого используются элементы системы менеджмента качества, распределение ответственности, KPI по качеству и инвестиции в совершенствование технологических процессов, что обеспечивает единую политику качества и последовательность в достижении поставленных целей.

2. Вовлечение персонала предусматривает участие сотрудников всех уровней в обеспечении качества технологического процесса. Реализация данного принципа достигается посредством обучения операторов установок плазменной закалки методам контроля качества, разработки стандартных рабочих процедур, проведения внутренней аттестации и формирования культуры непрерывных улучшений. В результате снижается количество ошибок и технологических отклонений, а также повышается производственная дисциплина.

3. Процессный подход основан на чётком определении последовательности стадий плазменной закалки, включающих подготовку поверхности, нагрев, охлаждение и контроль качества. Использование карт технологических процессов и стандартизации операций позволяет обеспечить стабильность характеристик поверхностного слоя и минимизировать вариации параметров упрочнения.

4. Системный подход к управлению предполагает интеграцию процесса плазменной закалки в общую систему управления качеством предприятия. Координация работы участков механической обработки, логистики, ремонта и термического упрочнения обеспечивает согласованность производственных этапов и снижение организационных несоответствий.

5. Принцип непрерывного улучшения (Kaizen) реализуется посредством постоянного анализа качества каждой партии упрочнённых деталей, корректировки технологических режимов и повышения стабильности процесса. Для этого применяются методы статистического управления процессами (SPC), контроль глубины упрочнённого слоя и анализ эксплуатационных

характеристик, что способствует росту производительности и снижению производственных затрат.

6. Принятие решений на основе данных предусматривает объективную оценку качества на основе результатов измерений и испытаний. В процессе плазменной закалки используются методы статистического контроля, металлографические исследования и испытания на износостойкость, позволяющие повысить достоверность контроля и обоснованность принимаемых технологических решений.

7. Взаимовыгодные отношения с поставщиками направлены на обеспечение стабильных поставок качественных материалов, расходных компонентов и оборудования для плазменной обработки. Реализация данного принципа включает оценку поставщиков, применение технических регламентов и заключение договоров с сервисными обязательствами, что повышает устойчивость производственного процесса и снижает вероятность простоев.

8. Ориентация на предотвращение брака заключается во внедрении профилактического контроля на всех стадиях плазменной закалки. Для минимизации дефектов и снижения затрат на переделку применяются методы FMEA-анализа, чек-листы контроля и автоматизированный мониторинг параметров процесса, позволяющие своевременно выявлять потенциальные несоответствия и предотвращать возникновение отказов.

Исходя из анализов принципов TQM для процесса плазменной закалки при упрочнении тяжело нагруженных деталей почворезущих машин выявлено, что реализация принципов всеобщего управления качеством (TQM) в процессе плазменной закалки тяжело нагруженных деталей почворезущих машин представляет собой комплексный подход к обеспечению стабильного и воспроизводимого качества упрочнённой продукции. Применение TQM позволяет систематизировать управление качеством на всех уровнях – от ориентации на требования конечного потребителя до постоянного совершенствования производственного процесса на основе объективных данных.

Таким образом, применение TQM в процессе плазменной закалки с использованием установок типа УДГЗ-200 обеспечивает не только повышение технических характеристик упрочнённых деталей, но и способствует формированию высокоэффективной производственной среды. Этот подход является перспективным направлением в развитии современных технологий упрочнения для сельскохозяйственного машиностроения.

Одним из эффективных инструментов анализа и контроля качества процесса плазменной закалки тяжело нагруженных деталей, в том числе для выявления причин возникновения дефектов, является диаграмма Исикавы [45]. Схема Исикавы, разработанная применительно к процессу плазменной закалки, представлена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Диаграмма Исикавы для процесса плазменной закалки

Анализируя выявленные факторы из диаграммы Исикавы по процессу плазменной закалки тяжело нагруженных деталей, определяются ключевые проблемы [46].

Рассмотрены пути решения проблем по разработанной диаграмме Исикавы:

1. «Оператор» – для устранения проблем могут быть даны следующие рекомендации и мероприятия: проводить специализированное обучение операторов плазменной установки, с акцентом на чувствительность качества к изменению параметров; разработать регламент по настройке и запуску процесса плазменной закалки с пошаговой инструкцией; ввести систему внутреннего аудита знаний и периодической переквалификации персонала.

2. «Оборудование» – для устранения проблем могут быть даны следующие рекомендации и мероприятия: внедрить регулярное техническое обслуживание и калибровку оборудования, в том числе проверку расхода газа и стабильности дуги; вести журнал технического состояния установки УДГЗ-200; оснастить установку системой мониторинга параметров в реальном времени (с датчиками тока, температуры, расхода воды).

3. «Материалы» – для устранения проблем могут быть даны следующие рекомендации и мероприятия: внедрить строгий входной контроль партии материала (химический состав, твёрдость, микроструктура); использовать механическую или химическую очистку детали перед плазменной обработкой; использовать оптимальные марки сталей с высокой закаливаемостью.

4. «Методы» – для устранения проблем могут быть даны следующие рекомендации и мероприятия: разработать и внедрить технологические карты плазменной закалки для каждого типа детали (по толщине, геометрии, марке стали); провести экспериментальный отбор режимов на основе микрошлифов и микротвердости, с построением зависимостей «глубина закалки – режим»; применять метод FMEA для предотвращения технологических отклонений.

5. «Окружающая среда» – для устранения проблем могут быть даны следующие рекомендации и мероприятия: обеспечить стабильную климатическую зону на участке термообработки (температура +18...25°C, влажность < 60%); контролировать уровень влажности для предотвращения коррозии заготовок; регулярно проводить очистку рабочей зоны от загрязнений; оснастить участок системой фильтрации воздуха и вытяжной вентиляцией; установить стабилизаторы напряжения для исключения просадок в питающей сети.

6. «Процесс» – для устранения проблем могут быть даны следующие рекомендации и мероприятия: разработать технологические карты плазменной закалки для каждой номенклатуры деталей (в том числе лемехов и лап), с учётом толщины, марки стали и формы поверхности; включить в карты параметры: сила тока, напряжение дуги, скорость перемещения плазмотрона, зазор до поверхности, давление охлаждающей воды, длительность воздействия; провести экспериментальные исследования с построением графиков зависимости глубины упрочнённого слоя от основных параметров (тока, скорости, зазора); подобрать оптимальные режимы, обеспечивающие требуемую глубину закалки (0,8–1,5 мм

для стали 65Г) и однородность структуры; применить FMEA-анализ для выявления наиболее критичных сбоев в процессе закалки (например, отклонение зазора $> \pm 0,5$ мм); определить уровень риска (RPN) для каждого элемента процесса и установить приоритеты в устранении.

Вышеуказанные мероприятия, а именно оптимизация режимов работы, контроль качества материалов и повышение квалификации персонала, надлежащее содержание рабочего места могут повысить стабильность процесса. Внедрение разработанных мероприятий и рекомендаций позволит снизить количество брака и дефектов, улучшить стабильность процесса упрочнения, что приведет к продлению срока службы деталей, повысит эффективность работы сельскохозяйственной техники.

1.4 Анализ современных методов плазменной обработки стали

В условиях современной индустриализации и стремительного развития технологий всё большее внимание уделяется методам упрочнения и модификации поверхности конструкционных материалов. Среди них особое место занимает плазменная обработка стали, как одна из наиболее прогрессивных технологий повышения износостойкости, коррозионной стойкости и твердости. Применение плазмы позволяет эффективно управлять структурой и фазовым составом поверхностных слоев металлов.

Цель плазменной обработки – изготовление деталей и инструмента с упрочненным поверхностным слоем толщиной до нескольких миллиметров при неизменном общем химическом составе материала и сохранении во внутренних слоях первоначальных свойств исходного металла. Считается, что любое вещество, нагретое до температуры более 6000 К, переходит в плазменное состояние. Для плазменной обработки используют одноатомные и многоатомные газы, которые при нормальном давлении и температуре энергетически нейтральны. Под действием энергии сжатой электрической дуги, генерируемой плазматроном, нейтральный газ ионизируется и переходит в плазменное состояние. Сущность термической ионизации газа заключается в отрыве от атомов газа одного или нескольких электронов и возникновении при этом двух или нескольких заряженных частиц: оторвавшихся электронов и остаточного иона. Оторвавшиеся электроны при соударении с атомами выбивают из них электроны, и таким образом возникает электронная лавина – атомы переходят в ионы, и газ ионизируется [47].

Закалка представляет собой процесс нагрева металла до определённой критической температуры (не ниже 750°C) с последующим интенсивным охлаждением, в результате чего твёрдость сталей и чугунов возрастает в 2-3 раза – с 20-25 до 50-65 единиц по шкале Роквелла. Это приводит к существенному снижению интенсивности изнашивания деталей, которое в ряде случаев уменьшается в десятки и даже сотни раз. Закалка остаётся наиболее распространённым и востребованным методом упрочнения, поскольку без её применения такие элементы, как пружины, шариковые и роликовые подшипники качения, режущий и штамповый инструмент, оказываются практически непригодными к эксплуатации.

В практике применения плазменного нагрева можно выделить два основных направления. Первое связано с использованием плазмы тлеющего разряда в условиях вакуумной камеры при остаточном давлении воздуха 1,33–13,3 Па. Данный метод получил широкое распространение при химико-термической обработке инструмента и других малогабаритных деталей. К этому направлению также относится электролитно-плазменное упрочнение, при котором электролитный нагреватель, включённый в электрическую цепь в качестве анода, подводится к изделию, выполняющему функцию катода. Замыкание электрической цепи между анодом и обрабатываемой поверхностью осуществляется через электролит – водный раствор соли.

Второе направление применения плазменного нагрева основано на использовании сжатой электрической дуги прямого или косвенного действия, формируемой специализированным плазмотроном [47, с. 89-97]. Под воздействием стенок канала сопла и потока плазмообразующего газа происходит сжатие дугового столба, сопровождающееся уменьшением его поперечного сечения и повышением температуры в центральной зоне до 10000–50000 К. В результате внутренний слой газа, контактирующий с дугой, переходит в плазменное состояние, тогда как внешний слой, омывающий стенки сопла, остаётся относительно холодным и выполняет функции тепловой и электрической изоляции между плазменным потоком и каналом сопла. Этот охлаждённый газовый слой предотвращает отклонение дуги от заданного направления и её замыкание на стенки сопла. Напряжение сжатой дуги достигает 60-200 В, что примерно втрое превышает аналогичный показатель свободной дуги. Плотность тока при этом может достигать 100 А/мм², что на порядок выше, чем у свободной дуги, а удельная мощность – до 2×10^6 Вт/см² [48].

Высокая эффективность плазменной обработки обусловлена совокупностью следующих факторов:

- тепловым и газодинамическим воздействием плазменного потока;
- взаимодействием металла с ионизированными и возбужденными частицами, а также озоном;
- излучением в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом диапазонах;
- термической и структурной неоднородностью плазмы;
- наличием низко- и высокочастотных пульсаций плазменного потока;
- перемешиванием плазмы с холодным газом окружающей среды;
- специфическим характером взаимодействия плазмы с металлической поверхностью, включая влияние жировых, водяных и адсорбированных молекул.

Основными характеристиками плазмы, оказывающими влияние на технологию плазменной обработки, выступают её температура, давление, энтальпия, скорость истечения и состав.

В таблице 6 приведены основные методы плазменной обработки материалов и их назначение [49].

Таблица 6 – Назначение плазменной обработки материалов

Метод	Описание и назначение
Плазменная активация	Технологический процесс обработки поверхности материалов с использованием плазмы, направленный на образование свободных радикалов, что приводит к повышению химической активности и улучшению адгезионных свойств. Используется для подготовки поверхности материалов перед нанесением покрытий или адгезивов.
Плазменная химико-термическая обработка (азотирование, цементация, борирование и др.)	Процесс насыщения поверхности металла активными элементами (например, азотом или углеродом) в плазменном разряде при повышенных температурах. Применяется для упрочнения поверхностей металлических изделий, таких как детали машин, инструментов и штампов.
Плазменная закалка дугой прямого действия	Метод используется для локального нагрева и закалки поверхностных слоёв металлических изделий с целью повышения их твёрдости и износостойкости. Плазма создаётся между электродом и обрабатываемой поверхностью, обеспечивая локальный, высокоинтенсивный нагрев с минимальным тепловым влиянием на основной материал. Применяется для обработки деталей, подверженных интенсивному износу.
Вакуумно-плазменная обработка	Процесс обработки материалов в вакууме с использованием плазмы для улучшения их поверхностных свойств. Вакуумно-плазменная обработка применяется для очистки поверхностей, активации, нанесения тонких покрытий и улучшения адгезии.
Электролитно-плазменная обработка	Метод модификации поверхности металлов с использованием электрического разряда в электролите, формирующего оксидные или защитные слои. используется для улучшения свойств изделий из лёгких и тугоплавких металлов с целью повышения коррозионной стойкости, твердости и декоративных свойств
Детонационное напыление	Метод газотермического напыления, при котором порошковый материал нагревается и ускоряется за счёт энергии детонации газовой смеси, а затем наносится на поверхность детали. Используется для восстановления изношенных деталей, улучшения их износостойкости и коррозионной стойкости, а также для создания защитных покрытий на различных материалах

Приведенная в таблице 6 характеристика методов позволяет выбрать принципиальные направления, процессы и методы упрочняющей обработки в зависимости от технических задач, требований к свойствам поверхности и особенностей обрабатываемого материала.

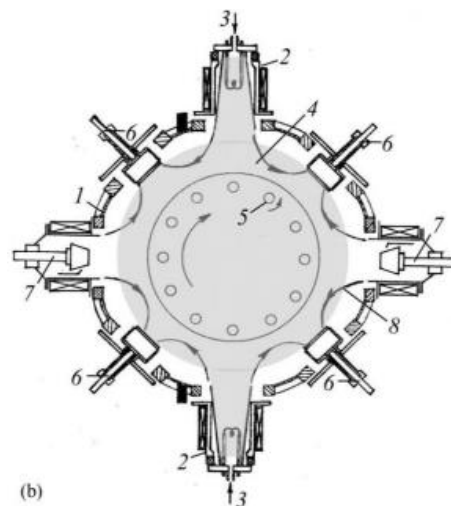
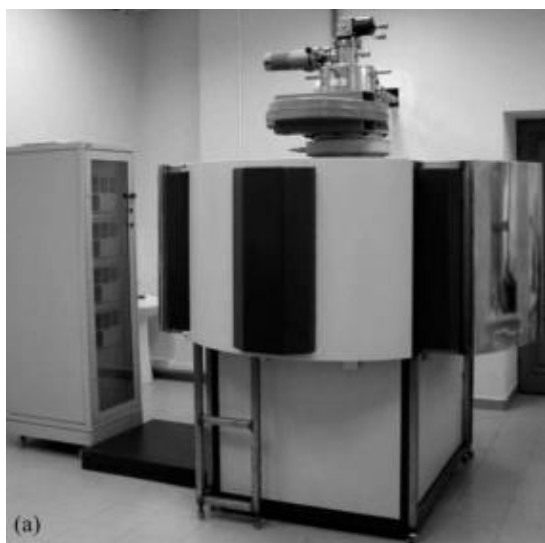
Необходимо отметить, что плазменная закалка, как передовая технология, не является простым и легким в применении методом. Она требует детального понимания ее особенностей и механизмов, что, в свою очередь, обуславливает необходимость глубокого и тщательного изучения. Это процесс, в ходе которого на молекулярном уровне происходят изменения, ведущие к формированию

новой структуры металла, что обеспечивает его улучшенные свойства [50].

Следует учитывать, что процесс плазменной заковки не является статичным и может меняться в зависимости от различных факторов, таких как вид стали, его начальная структура, размеры и форма обрабатываемой детали, ее применение и условия эксплуатации. Это требует разработки оптимальных режимов обработки для каждого конкретного случая, что включает в себя правильный выбор температуры заковки, длительности нагрева, скорости охлаждения и других параметров. Для достижения этого необходима постоянная работа над научно-исследовательскими проектами и тестированием в различных условиях [51].

Из-за невозможности рассмотрения всех способов упрочнения, связанного ограничением объема данной работы, рассмотрены самые распространённые из них.

Вакуумно-плазменная обработка представляет собой метод упрочнения поверхностного слоя стали, основанный на использовании принципов плазменной заковки в условиях вакуума. Применение вакуумной среды позволяет минимизировать влияние внешней атмосферы на процесс обработки и обеспечить равномерное, стабильное формирование упрочнённого слоя.



1 – вакуумная камера; 2 – катодные узлы генератора газоразрядной плазмы; 3 – напуск рабочего газа; 4 – объёмная плазма; 5 – обрабатываемые изделия; 6 – магнетронно-распылительные системы; 7 – электродуговые испарители; 8 – линии замкнутого магнитного поля («магнитная стенка»)

Рисунок 5 – Общий вид (a) и структурная схема (b) технологической установки «SPRUT»

Примечание – Составлено по источнику [17, с. 157]

В соответствии с рисунком 5, процедура вакуумно-плазменной обработки проводится в герметичной камере, где создаётся разрежение с давлением в пределах $(1,0-5,0) \times 10^{-3}$ Па. После установления необходимого уровня вакуума в камеру вводится плазмообразующий газ – чаще всего аргон, либо смеси аргона с

азотом или метаном, в зависимости от целей обработки. В рабочей зоне возбуждается тлеющий или дуговой разряд между катодом и анодом, либо между катодом и обрабатываемой деталью в случае самокатодной схемы. Напряжение в зоне обработки варьируется в пределах 400–900 В, а плотность тока достигает до 10 мА/см² [52].

Температура на поверхности взаимодействия плазмы с металлом составляет 400–900°С. Продолжительность воздействия определяется требуемой глубиной упрочнения и составом материала. Для выполнения термической заковки время обработки составляет 20–60 минут, тогда как химико-термическая обработка (например, азотирование или борирование) требует времени от 1 до 4 часов.

На практике при вакуумно-плазменной обработке почворежущих деталей из сталей марок 65Г, 40Х, 30ХГСА и аналогичных применяются следующие параметры (таблица 7).

Таблица 7 – Технологические параметры вакуумно-плазменной заковки стали

Параметр	Значение
Давление в камере, Па	$(1,5-5,0) \times 10^{-3}$
Температура поверхности, °С	750–800
Газовая среда	Ar + N ₂ (80:20)
Напряжение на аноде, В	500–700
Продолжительность обработки, мин	60
Твёрдость после обработки, HV	720–780
Глубина упрочнённого слоя, мм	0,3–0,5

Параметры вакуумно-плазменной заковки обеспечивают формирование однородного поверхностного слоя с заданными механическими характеристиками. Метод обладает рядом преимуществ, включая высокую чистоту процесса за счет создания вакуума, минимизацию окисления металла, возможность точного контроля температурных режимов и равномерного распределения термического воздействия. Эти свойства делают его востребованным для прецизионных деталей, где критически важны стабильные геометрические размеры, отсутствие обезуглероживания и высокая износостойкость при умеренных нагрузках. Однако при обработке тяжело нагруженных элементов почвообрабатывающих машин выявляются определённые ограничения, снижающие технологическую и эксплуатационную эффективность метода [53].

Ключевым фактором долговечности рабочих органов является не только поверхностная твёрдость, но и глубина упрочнённого слоя, способного противостоять пластическим деформациям и усталостному разрушению. Вакуумно-плазменная заковка обычно обеспечивает упрочнение на глубину 0,2–0,5 мм, что оказывается недостаточным для деталей, эксплуатируемых в условиях ударно-абразивного износа. Поверхностный слой быстро истирается, и основной металл становится уязвимым, особенно при работе на твёрдых и каменистых почвах.

Процесс вакуумно-плазменной закалки требует применения герметичных камер с высокоточными системами контроля вакуума и генерации плазмы. Это накладывает ограничения на размеры обрабатываемых деталей и усложняет обработку изделий сложной формы, таких как изогнутые стойки или профилированные лапы культиваторов. Кроме того, время на установление вакуума и прогрев камеры снижает производительность и экономическую эффективность при серийном производстве [54].

При длительной эксплуатации в агрессивной абразивной среде поверхность деталей нагревается до высоких температур. Упрочнённые слои, полученные вакуумно-плазменной закалкой, демонстрируют меньшую термическую стабильность по сравнению с обработкой методом плазменной или лазерной закалки с активным теплоотводом, что приводит к снижению твёрдости и деградации эксплуатационных характеристик при длительной работе в тяжёлых почвенно-климатических условиях.

Таким образом, несмотря на высокую точность процесса и качество поверхности, вакуумно-плазменная закалка не полностью удовлетворяет требованиям к рабочим органам почвообрабатывающих машин, эксплуатируемых в тяжёлых условиях.

Одним из перспективных методов поверхностного упрочнения является электролитно-плазменная обработка (ЭПО), которая получила развитие в ряде стран с активными исследованиями в области металлообработки и модернизации машиностроительных процессов. Наибольшее распространение ЭПО получила в России, Китае, Германии и США.

Ряд исследований, проведённых зарубежными и отечественными учёными – Баяти М.Р., Джангорбан К., Кусманова А.Т., Смирнов В.И., Белкин А.П. – показал, что применение ЭПО значительно повышает износостойкость и другие эксплуатационные показатели поверхности стали. В исследованиях казахстанского учёного Комбаева К. было установлено, что обработка электролитно-плазменным методом позволяет существенно увеличить микротвёрдость и улучшить трибологические свойства поверхностного слоя, снижая коэффициент трения и повышая стойкость к абразивному износу [55-59]. В работах Рахадилова Б.К. установлено, что ЭПО позволяет повысить микротвёрдость поверхности конструкционной стали 40ХН в 4,5 раза, при этом формируется мелкоигльчатый мартенсит [60].

В настоящее время широко применяется наплавки и сплавы типа Сормайт для повышения износостойкости деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного и ударного нагружения. Экспериментальные данные показывают, что использование наплавки износостойкими сплавами, включая сормайт, позволяет увеличить износостойкость рабочих поверхностей в несколько раз по сравнению с исходным металлом [61-64].

Однако, как отмечается в ряде исследований, данный способ упрочнения не всегда обеспечивает значительное увеличение срока службы в условиях сложных нагрузок, а также характеризуется ограниченной глубиной упрочнённого слоя и возможной неоднородностью структуры [65].

Поверхностная закалка с использованием плазменного источника тепла рассматривается как один из наиболее перспективных и технологически целесообразных способов повышения эксплуатационной надежности почвообрабатывающих элементов сельскохозяйственных машин, включая плужные лемехи, долота и рабочие органы культиваторов. В процессе эксплуатации данные элементы функционируют в условиях сочетания воздействия абразивных частиц, ударных нагрузок и химически активной почвенной среды. Определяющим фактором, ограничивающим ресурс таких деталей, выступают процессы абразивного и фреттинг-изнашивания, обусловленные взаимодействием с почвами, содержащими твердые включения различной природы, в том числе песчаные фракции, каменистые частицы и остаточные компоненты минеральных удобрений.

На современном этапе развитие технологий поверхностного упрочнения с применением плазменной дуги осуществляется в рамках устойчиво сформированных научных направлений, представленных ведущими исследовательскими центрами индустриально развитых государств. Существенные достижения в данной области зафиксированы в Германии, Китае, Российской Федерации, США и Японии, где реализуются как фундаментальные исследования, так и прикладные разработки, ориентированные на промышленное внедрение.

Российская научная школа характеризуется длительным и системным изучением процессов дуговой термической обработки. Основные результаты связаны с созданием и внедрением промышленных технологий поверхностной закалки рабочих органов сельскохозяйственной техники и элементов машин, эксплуатируемых в условиях интенсивного износа. Влияние плазменно-дуговой обработки на структурно-фазовое состояние и механические свойства различных сталей подробно рассмотрено в трудах отечественных исследователей, включая В.А. Короткова, М.В. Миронову, Е.Н. Сафонова и А.Е. Балановского [66, 67].

Несмотря на сравнительно ограниченный массив публикаций, посвящённых конструкционной стали 65Г, результаты имеющихся исследований подтверждают технологическую применимость плазменно-дуговой закалки к данной марке. Анализ литературных источников показывает, что в результате обработки формируется тонкий ($\sim 0,4\text{--}1,4$ мм) слой игольчатого мартенсита с включениями остаточного аустенита и карбидов; значения микротвёрдости достигают 780–820 HV, что более чем вдвое превышает исходные показатели. Кроме того, фиксируется рост усталостной выносливости и стойкости абразивному изнашиванию, особенно в условиях переменных и ударных нагрузок, а также устойчивость материала к проявлениям отпускной хрупкости, что объясняется локализованным характером теплового воздействия.

Исследования казахстанских авторов А.Т. Канаева, А.А. Гуляренко и Т.Е. Сарсембаевой посвящены применению плазменной закалки для повышения ресурса сменных элементов почвообрабатывающих машин. Полученные ими результаты свидетельствуют о существенном увеличении твёрдости, износостойкости и срока службы упрочнённых деталей, что подтверждает

эффективность рассматриваемой технологии при эксплуатации в условиях выраженного абразивного и ударного износа [68, 69].

Особую практическую значимость плазменная закалка приобретает применительно к плужным лемехам и лапам культиваторов, которые по своей конструктивной природе относятся к тонкостенным элементам. В отличие от массивных узлов рам, корпусов редукторов, ведущих валов и колесных пар – данные рабочие органы проектируются с пониженной толщиной с целью уменьшения массы и обеспечения упругой деформации при взаимодействии с уплотнённой или каменистой почвой. Вместе с тем такая геометрия существенно повышает чувствительность деталей к термическим воздействиям. Применение традиционных методов объемной термической обработки в этом случае может сопровождаться возникновением значительных остаточных напряжений, короблением, образованием трещин и снижением эксплуатационной надёжности.

Тонкостенная конфигурация лемехов и лап культиваторов существенно ограничивает использование классических технологий упрочнения, включая объемную закалку, цементацию и высокотемпературную нитроцементацию. Указанные методы, как правило, приводят к развитию внутренних напряжений и геометрических искажений, что делает их малопригодными для серийного и массового производства. Дополнительным недостатком является высокая энергоёмкость и продолжительность технологических циклов, а также необходимость последующей механической обработки, что в совокупности увеличивает себестоимость изготовления деталей [70].

В Республике Казахстан широкое распространение получили плужные лемехи и лапы культиваторов, изготавливаемые из доступных углеродистых и низколегированных сталей, таких как Л53, 40Х и 65Г. Эксплуатационный ресурс изделий из указанных материалов в значительной степени определяется уровнем твёрдости и прочности, которые, в свою очередь, зависят от применяемых режимов термической обработки. В состоянии поставки твёрдость таких сталей, как правило, не превышает 25–30 HRC (250–300 HV), предел прочности находится в диапазоне 900–1200 МПа, а показатели ударной вязкости составляют 0,2–0,6 МДж/м².

В зарубежной практике быстроизнашивающиеся элементы рабочих органов сельскохозяйственных машин преимущественно изготавливаются из более прочных среднеуглеродистых и низколегированных сталей. Совмещение рационального выбора материала со специализированными методами термического упрочнения позволяет получать сменные детали с твёрдостью на уровне 50–60 HRC, пределом прочности свыше 1200 МПа и ударной вязкостью порядка 0,8–0,9 МДж/м². В этом направлении рядом западноевропейских компаний, включая «KVERNELAND» (Норвегия), «Rabe» (Германия) и «OVERUM» (Швеция), были разработаны и внедрены наукоемкие технологии, основанные на использовании плазменных методов упрочнения рабочих поверхностей [71].

Характерной особенностью рассматриваемых изделий является наличие двух- либо трёхкомпонентной структуры упрочнённого поверхностного слоя,

формирующей так называемую диссипативную, или градиентно-слоистую, структуру материала по сечению. При этом внешние слои отличаются повышенными прочностными показателями, достигающими 1200–1800 МПа, а также твёрдостью до 65 HRC, тогда как пластичная сердцевина обеспечивает необходимый уровень ударной вязкости и сопротивление хрупкому разрушению. Следует отметить, что возможности повышения твёрдости и износостойкости лемехов плугов и стрелчатых лап культиваторов за счёт введения дорогостоящих и дефицитных легирующих элементов, таких как вольфрам и молибден, в настоящее время существенно ограничены. Одновременно с этим потенциал традиционных схем термической обработки, включающих закалку в масле с последующим отпуском, практически исчерпан с точки зрения дальнейшего увеличения твёрдости стали. В этой ситуации наиболее рациональным направлением повышения эксплуатационной долговечности почвообрабатывающих деталей является применение технологий поверхностного упрочнения методом плазменной закалки [72].

Использование плазменной закалки позволяет упрочнять участки, подвергающиеся максимальному изнашиванию, включая режущие кромки, носовые и лобовые зоны рабочих органов. Такой локальный характер теплового воздействия способствует снижению общей термической нагрузки на изделие и минимизации остаточных деформаций. Данное обстоятельство приобретает особую значимость при обработке лемехов и культиваторных лап сложной пространственной формы, для которых сохранение геометрической точности непосредственно определяет ресурс и эффективность эксплуатации.

В условиях актуализации задач технологической независимости внедрение процессов плазменной закалки на предприятиях национальной промышленности создаёт предпосылки для организации серийного производства износостойких и долговечных деталей, сопоставимых по эксплуатационным характеристикам с зарубежными аналогами, без существенного роста себестоимости продукции.

Вместе с тем при реализации поверхностной плазменной закалки дугой прямого действия ключевое значение имеет корректный выбор режимов обработки, поскольку именно они формируют тепловую историю материала, определяют толщину упрочнённого слоя, фазовый состав и морфологию образующихся структур, а также совокупность эксплуатационных свойств модифицированной поверхности. Под режимами обработки понимается совокупность технологических параметров, включающая величину сварочного тока, уровень напряжения, скорость перемещения плазменной дуги относительно поверхности изделия, длительность теплового воздействия, а также параметры плазмообразующей среды, такие как состав, расход и давление газа [73].

Рациональная настройка указанных параметров обеспечивает достижение температур аустенитизации в поверхностном слое без перегрева и оплавления металла, создавая условия для устойчивого формирования мартенситной структуры в процессе последующего самозакаливании. Так, увеличение силы тока при одновременном снижении скорости перемещения дуги способствует углублению зоны прогрева, однако при превышении предельных значений

может привести к укрупнению зерна, возникновению трещин или локальному расплавлению поверхности. В противоположном случае, чрезмерно высокая скорость перемещения источника тепла способна вызвать недостаточный нагрев и формирование слабо упрочнённого или неоднородного слоя.

Отклонение от оптимальных режимов плазменной закалки может сопровождаться перегревом материала, развитием трещинообразования, нестабильностью сформированной структуры либо недостаточным уровнем упрочняющего эффекта. В этой связи режимы поверхностной плазменной закалки дугой прямого действия выступают определяющим фактором, обеспечивающим воспроизводимость, стабильность и высокую технологическую результативность процесса. Комплексное управление параметрами обработки с учётом физико-химических характеристик плазмы, кинетики фазовых превращений и теплофизических свойств материала позволяет формировать упрочнённые слои с высокими эксплуатационными показателями при минимальном риске дефектообразования. Именно научно обоснованный выбор режимов является ключевым условием технологической и экономической эффективности применения установки УДГЗ-200 в машиностроении, сельскохозяйственном производстве и смежных отраслях.

1.5 Обзор нормативно-технической документации

Плазменная закалка сталей относится к современным методам поверхностного термического упрочнения, при котором за счёт локального высокоэнергетического нагрева поверхностного слоя и последующего интенсивного охлаждения формируется упрочнённая структура с повышенной твёрдостью, износостойкостью и сопротивлением контактно-абразивному разрушению. В Республике Казахстан отдельного национального стандарта, регламентирующего именно технологический процесс плазменной закалки сталей как самостоятельный вид обработки, в открытых нормативных источниках не установлено. Поэтому нормативное обеспечение данного процесса формируется комплексно: через законодательство РК в области технического регулирования и стандартизации, стандарты на термическую обработку, стандарты на методы испытаний, металлографический контроль, измерение твёрдости, определение глубины упрочнённого слоя, контроль качества поверхности, а также через внутреннюю технологическую документацию предприятия.

Правовую основу применения стандартов в Республике Казахстан составляют Закон РК «О стандартизации» от 5 октября 2018 года №183-VI и Закон РК «О техническом регулировании» от 30 декабря 2020 года №396-VI.

С позиции действующей нормативной базы проблема плазменной закалки состоит в отсутствии прямого, специализированного документа, который бы комплексно устанавливал требования именно к плазменной закалке конструкционных углеродистых сталей: к режимам процесса, подготовке поверхности, параметрам плазмотрона, допустимым диапазонам тока, напряжения, скорости перемещения, расстояния до поверхности, глубине упрочнённого слоя, структуре, твердости, остаточным напряжениям, правилам

приемки и методам контроля. В найденных источниках есть стандарты на термины термообработки, на материал, на методы измерения твердости, зерна, шероховатости и отбора проб, но отдельный ГОСТ, СТ РК или ISO, посвященный именно плазменной закалке конструкционных углеродистых сталей как целостному технологическому процессу – нет.

Для термообработки сталей международным опорным документом является ISO 4885:2018, который устанавливает термины в области тепловой обработки ферросплавных и стальных материалов. Такой стандарт полезен для унификации понятийного аппарата: «закалка», «самоотпуск», «аустенитизация», «поверхностное упрочнение», «эффективная глубина слоя» и т.п. Но он не регламентирует конкретную плазменную технологию.

Для углеродистых конструкционных сталей долгое время базовым межгосударственным документом был ГОСТ 1050-88 «Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали». ГОСТ 9013-59 устанавливает метод измерения твердости по Роквеллу; ГОСТ 2999-75 – метод измерения твердости по Виккерсу; ГОСТ 1763-68 – методы определения глубины обезуглероженного слоя; ГОСТ 5639-82 – металлографические методы выявления и определения величины зерна; ГОСТ 2789-73 – параметры и характеристики шероховатости поверхности; ГОСТ 7564-97 устанавливает общие правила отбора проб и образцов для испытаний, а новая редакция ГОСТ 7564-2026 уже принята, но вводится позже. На международном уровне тем же задачам соответствуют ISO 6508-1:2023 для Rockwell, ISO 6507-1:2023 для Vickers, ISO 643:2024 для металлографического определения размера зерна и ISO 6506-1:2014 для Brinell.

Технология плазменной закали в реальном производстве зависит от конкретного оборудования, оснастки, геометрии деталей, источника питания, схемы перемещения, способа охлаждения и номенклатуры изделий, марки стали. Стандарт организации позволяет зафиксировать наилучшие отработанные режимы именно для конкретной установки, УДГЗ-200 и конкретных марок сталей. Кроме того, казахстанская нормативная база прямо допускает разработку стандартов организации на продукцию, процессы и услуги, в том числе когда действующих национальных или межгосударственных документов недостаточно или они отсутствуют.

Таким образом, проведенный анализ нормативной документации показал, что в действующей системе стандартизации отсутствует специализированный ГОСТ или СТ РК, комплексно регламентирующий технологический процесс плазменной закали конструкционных углеродистых сталей, при наличии отдельных стандартов на методы контроля, испытаний и оценки качества поверхностного слоя. В связи с этим научно и нормативно обоснована разработка стандарта организации СТО ТОО 190740006823-01-2026 «Плазменная закалка изделий из углеродистых конструкционных сталей», позволяющего установить оптимальные режимы обработки для установки УДГЗ-200 и обеспечить стабильность технологического процесса и качества упрочнённых изделий.

Выводы по разделу

1. Изучены основные виды износа. Особое внимание уделено классификации типов износа (абразивного, ударного, адгезионного, коррозионного) и их зависимости от механического состава почв, что крайне актуально для условий Казахстана. Недостаточная износостойкость существующих серийных деталей, особенно при эксплуатации на песчаных и супесчаных почвах, обуславливает их преждевременный выход из строя и снижает эффективность обработки. Это определяет острую необходимость применения современных методов упрочнения.

2. Рассмотрены методы системного управления качеством продукции. Методом анализа рисков и отказов (FMEA) были выявлены потенциальные отказы и последствия отказов тяжело-нагруженных почвообрабатывающих машин с учетом критичности их рабочих органов к износу и эксплуатационным нагрузкам, и функционированием в условиях интенсивного абразивного износа; даны рекомендации по снижению рисков и отказов. Также разработана диаграмма Исикавы и принципы TQM для процесса плазменной закалки при упрочнении тяжело-нагруженных деталей почвообрабатывающих машин. Эти подходы обеспечивают не только снижение отказов, но и выстраивают системную политику обеспечения качества продукции. Применение разработанных рекомендаций позволит повысить стабильность процесса упрочнения, сократить число дефектных изделий и, как следствие, увеличить долговечность деталей и улучшить эксплуатационные показатели сельскохозяйственной техники.

3. Изучены методы и исследования в области плазменной закалки. Выявлено, что поверхностная плазменная закалка дугой прямого действия обладает большей термической стабильностью по сравнению с другими видами плазменной закалки. Это приводит к повышению твердости в 2-2,5 раз и повышению упрочнённых свойств при длительной работе в тяжёлых почвенно-климатических условиях. Кроме того, поверхностная плазменная закалка дает возможность упрочнять наиболее изнашиваемые зоны, что минимизирует деформации и снижает тепловую нагрузку на весь элемент.

4. Проведённый анализ нормативно-технической документации показал отсутствие специализированного ГОСТ или СТ РК, комплексно регламентирующего технологию плазменной закалки конструкционных углеродистых сталей, несмотря на наличие отдельных стандартов, определяющих методы контроля, испытаний и оценки качества поверхностного слоя. В связи с этим разработка стандарта организации для плазменной закалки является научно и нормативно обоснованной, поскольку позволяет установить оптимальные технологические режимы обработки и обеспечить стабильность качества упрочнённых изделий.

Таким образом, результаты анализа подтверждают актуальность и обоснованность выбора технологии плазменной обработки как перспективного и технологически эффективного метода повышения ресурса и эксплуатационной надёжности рабочих органов сельскохозяйственной техники. Материалы данного раздела создают основу для дальнейших экспериментальных и

производственных исследований, направленных на оптимизацию параметров обработки и адаптацию поверхностной плазменной закалки к условиям Республики Казахстан.

2 ОБЪЕКТЫ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Характеристика объекта исследования

С учетом результатов теоретического анализа, представленного в предыдущем разделе, в настоящем разделе рассматриваются объекты, материалы и методы экспериментальных исследований, направленных на изучение влияния плазменной закалки на структуру и эксплуатационные свойства почворежущих деталей сельскохозяйственных машин. Особое внимание уделено обоснованию выбора материала, описанию лабораторного оборудования, а также методам исследования микроструктуры, фазового состава и физико-механических характеристик стали после термического упрочнения. Для обоснования выбора объекта исследования и параметров его упрочнения были рассмотрены особенности условий работы почворежущих элементов и требования, предъявляемые к их материалу.

Почворежущие элементы рабочих органов сельскохозяйственных машин характеризуются значительным разнообразием форм, размеров и условий эксплуатации. В процессе работы они подвергаются воздействию статических, циклических и ударных нагрузок, а также взаимодействию с различными средами – почвой, растительными остатками, влагой и др. Эксплуатация в таких экстремальных условиях предъявляет повышенные требования к обоснованию критериев долговечности и работоспособности этих деталей [73].

С точки зрения материаловедения к основным показателям эксплуатационной пригодности сменных рабочих органов почвообрабатывающей техники относят: конструкционную прочность, твердость, ударную вязкость, пластичность и сопротивление износу. При проведении термической упрочняющей обработки стали характер фазово-структурных превращений аустенита зависит от скорости и степени охлаждения. Степень упрочнения закаленного изделия в значительной мере определяется механическими свойствами сформированного мартенсита. После закалки твердость мартенсита может достигать 65-67 HRC, что примерно в шесть раз превышает твердость ферритной составляющей [74, 75].

По значению твердость мартенсита приближается к твердости цементита, равной 69-71 HRC.

Для других структур твердость по мере убывания составляет: нижнего бейнита 46-57 HRC, верхнего бейнита 41-46 HRC, троостита 300-400 HB, сорбита 200-300 HB.

Высокое значение твердости мартенсита объясняется как повышенным содержанием в нем углерода (пересыщением α -раствора углеродом), так и фазовым наклепом в результате аустенитно-мартенситного превращения, что приводит к повышению плотности дислокаций и образованию на дислокациях атмосфер из атомов углерода и выделением из α -раствора дисперсных частиц карбидов. В свою очередь, сильное упрочнение сталей на мартенсит может приводить к значительному снижению пластичности стали [76].

При обосновании критериев работоспособности деталей рабочих органов почвообрабатывающих машин следует учитывать, что стали являются

сложными по химическому составу железоуглеродистыми материалами. Конструкционные стали всегда содержат определенное количество постоянных и случайных примесей, которые также влияют на механические свойства стали [77].

Значительное влияние на механические свойства конструкционных сталей, (до 0.8%) кроме углерода оказывают марганец, кремний, сера, фосфор, азот, ванадий, титан, алюминий, ниобий, хром, никель и др. элементы. Неметаллические примеси, содержащие серу и фосфор, относятся к вредным примесям. В зависимости от качества стали, содержание серы не должно превышать 0,035-0,055%. Допустимое содержание фосфора в стали не должно превышать 0,025-0,045%.

Марганец вводится в сталь для раскисления, остается в стали в количестве 0,3-0,8%. Марганец уменьшает вредное воздействие серы и кислорода. Кремний также вводится в сталь в качестве активного раскислителя и остается в ней в количестве до 0,4%. Кремний оказывает упрочняющее действие. Измельчению зерна в стали способствует ниобий (0,05%), алюминий (0,05%), ванадий (0.1%) [78].

Известно, что для экстремальных условий эксплуатации деталей традиционные методы их упрочнения малоэффективны. Проблема повышения конструкционной прочности по традиционной технологии состоит в том, что при высокой прочности углеродистой стали после закалки на мартенсит низкого отпуска она охрупчивается и становится ненадежной в эксплуатационных условиях [79].

Современные исследования демонстрируют, что сочетание высокой прочности, твердости и износостойкости с достаточными показателями вязкости и пластичности достигается за счёт целенаправленного формирования субмикро- и наноразмерной структуры металлического материала изделия [80, 81]. Увеличение доли измельченной, фрагментированной структуры, а также формирование дисперсных наночастиц в низколегированных сталях позволяет повышать прочностные характеристики на 20–30%, одновременно сохраняя высокие показатели вязкости и пластичности. Для сталей с мартенситной структурой упрочнение за счёт дисперсных частиц рассматривается как один из ключевых механизмов дополнительного повышения прочности и сопротивляемости распространению трещин.

Исследования показывают, что улучшение механических свойств – прочности, вязкости, пластичности и трещиностойкости – тесно связано с объёмным наноструктурированием стального материала. Материалы с крупным зерном более 10 мкм не демонстрируют признаков высокой пластичности. Это подтверждается анализом поверхности изломов разрушенных образцов: транскристаллитный, вязкий излом с характерными ямками формируется у ультрамелкозернистых сплавов, причём размер этих ямок уменьшается с уменьшением величины зерна [82].

До последнего времени в промышленности отсутствовали технологии изготовления рабочих органов почвообрабатывающих машин, полностью отвечающие экстремальным условиям эксплуатации. В большинстве случаев

применяются детали из стали марки 65Г или импортные аналоги. Среди всех рабочих органов наибольшее значение имеют лемех плуга и стрельчатая лапа культиватора, так как именно эти элементы испытывают наибольшие нагрузки в сравнении с другими частями машин (отвалами, полевыми досками, лапами культиваторов, сферическими дисками борон и дискаторов, ножами фрез и прочими). С точки зрения затрат энергии, пахота является наиболее трудоёмкой почвообрабатывающей операцией.

Изготовление и эксплуатация лемехов регламентируется как национальными стандартами Республики Казахстан, так и действующими межгосударственными стандартами. Технические условия на лемешные плуги общего назначения регулируются стандартами СТ РК СТБ 1388-2011, ГОСТ 33736-2016 и ГОСТ 24321-80. Согласно требованиям данных стандартов рабочие органы должны изготавливаться из конструкционных углеродистых или легированных сталей с высокими показателями прочности, твёрдости и износостойкости. Механические характеристики лемехов включают прочность при изгибе не менее 700 МПа, ударную вязкость ≥ 100 Дж/см², а также высокую износостойкость, с уменьшением потери массы при трении на 20–40%. Контроль качества предусматривает проверку геометрических размеров с точностью ± 1 мм, измерение твердости HV₃₀ с допустимым разбросом ± 50 единиц, а также визуальный осмотр на наличие трещин и деформаций. Эксплуатационные требования стандарта определяют возможность работы лемехов в почвах с силой сопротивления до 5–6 кгс/см² и ресурс лемеха в 500–800 га вспаханной площади. Рабочие кромки лемехов должны сохранять функциональные свойства при контакте с почвой и включениями твёрдых частиц, выдерживать ударные и абразивные нагрузки, возникающие при эксплуатации в различных почвенных условиях.

В качестве одного из стандартных материалов для изготовления лемехов применяется углеродистая сталь марки 65Г, которая после термической обработки обеспечивает требуемый комплекс механических свойств, включая твёрдость поверхности, ударную вязкость и износостойкость. Химический состав стали 65Г представлен в таблице 8.

Таблица 8 – Химический состав стали 65Г (ГОСТ 14959-2016)

Металл	Массовая доля элементов, %						
	C	Mn	Si	Ni	S	P	Cr
Сталь 65Г	0,62-0,7	0,9-1,2	0,17-0,37	до 0,25	до 0,035	до 0,035	до 0,25

Марка стали 65Г обозначается следующим образом: индекс «Г» указывает на наличие легирующего элемента марганца, а числовое значение «65» отражает массовую долю углерода в сотых долях процента. Введение марганца в состав стали способствует повышению её упругих свойств и увеличению сопротивления разрушению под нагрузкой.

Закалка стали 65Г проводится в температурном диапазоне 800-830°C. Последующий отпуск при температурах 160-200°C с охлаждением на воздухе обеспечивает достижение конечной твёрдости материала на уровне 45-47 HRC.

Сталь данной марки устойчива к перегреву, однако при закалке на предельно высоких температурах наблюдается снижение её ударной вязкости.

Физико-механические свойства деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин должны соответствовать реальным условиям эксплуатации. Такие элементы подвергаются статическим, циклическим и ударным нагрузкам, контактируют с почвой, растительными остатками, влагой и другими средами. В связи с этим ключевыми показателями работоспособности этих деталей являются конструкционная прочность, твёрдость, ударная вязкость, пластичность и износостойкость, что позволяет оценить их долговечность и надёжность в процессе эксплуатации.

Среди сталей зарубежного производства практический интерес (Финляндия) представляют бористые стали марок RAEXB, обладающие высокой прокаливаемостью. За счет легирования бором эти стали закаляются уже с малым содержанием углерода. Это придает стали высокую прочность и хорошую ударную вязкость. Бористые стали выпускаются в виде листов и полос различной толщины, что позволяет использовать их для изготовления деталей с различной геометрией и функциональной нагрузкой. Применение этих материалов позволяет увеличить долговечность и надёжность лемехов, дисков и лап культиваторов без необходимости дополнительного дорогостоящего легирования другими элементами [83].

Техническая и экономическая целесообразность материала в машиностроении преимущественно определяется исходя из эксплуатационных и технологических свойств. При этом эксплуатационные свойства должны иметь первостепенное значение в определении работоспособности деталей. Для деталей, работающих в экстремальных условиях эксплуатации, работоспособность оценивается комплексом механических свойств и сопротивляемостью абразивному изнашиванию. Качественный конструкционный материал для деталей с учетом условий их эксплуатации должен удовлетворять комплексу требований и иметь высокую конструкционную прочность и износостойкость.

Под конструкционной прочностью в данном случае понимается комплексная характеристика, включающая сочетание критериев прочности, надежности и долговечности

Конструкционная износостойкость характеризует соответствие формы режущей части детали условиям эксплуатации [84].

Прочность материала детали должна быть достаточна для ограничения упругой и пластической деформации при гарантированной надежности и долговечности.

Известно, что конструкционные стали по прочности, оцениваемой временным сопротивлением, условно подразделяются на стали нормальной (средней) прочности ($\sigma < 1000$ МПа), повышенной прочности ($\sigma < 1500$ МПа) и высокой прочности ($\sigma > 1500$ МПа) [85].

Материал для деталей рабочих органов деталей должен удовлетворять условиям высокой прочности.

Таким образом, анализ условий эксплуатации почворезущих элементов сельскохозяйственных машин и требований, предъявляемых к их материалу, показывает, что одним из наиболее рациональных материалов для изготовления данных деталей является низколегированная конструкционная сталь 65Г. Данная сталь обладает благоприятным сочетанием прочности, твердости и технологичности, а также хорошо поддается различным видам термического и термоупрочняющего воздействия, включая плазменную закалку.

В связи с этим возникает необходимость экспериментального исследования влияния плазменной обработки на структурное состояние и физико-механические свойства стали 65Г, используемой для изготовления рабочих органов почвообрабатывающих машин. Для реализации поставленной задачи в работе применён комплекс современных лабораторных методов и аналитического оборудования, описание которых приведено в следующем подразделе.

2.2 Лабораторное оборудование и методы исследований

Методика проведения исследований включала следующие этапы:

- определение химического состава методом лазерно-искровой спектрометрии;
- металлографический анализ с использованием оптической и электронной микроскопии;
- рентгеноструктурный анализ для определения фазового состава;
- измерение микротвёрдости и твёрдости методами Виккерса и Роквелла;
- определение глубины закалённого слоя по профилю микротвёрдости;
- испытания на износостойкость на трибометре по схеме «шар–плоскость»;
- испытания на ударный изгиб и изгиб для оценки прочностных характеристик;
- коррозионные испытания в агрессивных средах с оценкой потери массы.

Дополнительно проводились натурные испытания в полевых условиях с оценкой износа по потере массы и изменению геометрических параметров деталей.

Обработка результатов включала статистический анализ экспериментальных данных, построение зависимостей распределения твёрдости по глубине и установление взаимосвязи между параметрами плазменной обработки и эксплуатационными свойствами материала.

Данная методика обеспечивает комплексную оценку структуры, фазового состава и эксплуатационных характеристик тяжело-нагруженных деталей сельскохозяйственной техники.

Исследования проводились в лабораториях КАТИУ им С. Сейфуллина, лаборатории Научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология», на базе лаборатории ООО «Научно производственная фирма «Механик», город Екатеринбург, лаборатории «Дефектоскопия и

металловедение» АО «Qarmet», лаборатории физики твердого тела Астанинского филиала РГП на ПХВ «Институт ядерной физики».

В ходе экспериментальных исследований были использованы современные физико-химические методы анализа структуры, фазового состава, микротвёрдости, износостойкости, трещиностойкости и коррозионной стойкости стали 65Г [86]. Применение комплексного подхода позволило установить взаимосвязь между технологическими параметрами термического воздействия и эксплуатационными характеристиками закалённого слоя.

Образцы для металлографических и механических испытаний вырезались из рабочих зон деталей лемехов плуга и лап культиваторов стали 65Г, упрочненных плазменной закалкой, в соответствии с требованиями ГОСТ 5639-82, ГОСТ 1763-68, ГОСТ 6996-66 и ГОСТ 3443-87.

Процедура вырезки образцов проводилась на прецизионном отрезном станке Secotom-60, Struers (рисунок 6).

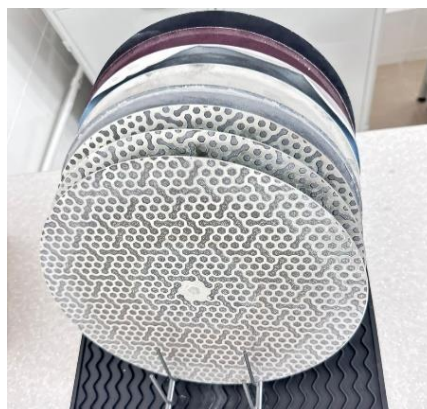


Рисунок 6 – Отрезной станок Secotom-60 (Struers)

Отрезной станок Secotom-60 (Struers) предназначен для высокоточной вырезки образцов с исключением термического и механического влияния, способного исказить их исходную микроструктуру.



а



б

Рисунок 7 – Шлифовально-полировальный станок Tegramin-25 (Struers)

В соответствии с рисунком 7, шлифовка и полировка образцов осуществлялась на шлифовально-полировальном станке Tegramin-25, Struers. Оборудование позволяет выполнять многоступенчатое шлифование и полирование с высокой воспроизводимостью результатов, исключая появление деформаций, царапин и перегрева структуры стали.

Шлифовка проводилась с применением абразивных шкурок различной зернистости согласно требованиям ГОСТ 6456-82. Последовательная обработка выполнялась абразивами зернистостью P180, P320, P600, P800, P1200.

Полировка осуществлялась с использованием алмазных паст марок по ГОСТ 9206-90. Полирование выполнялось на тканевых кругах с постепенным снижением давления до получения зеркальной поверхности без следов рисок и прижогов.

Для испытаний на износостойкость образцы подвергались горячей запрессовке с применением установки CitoPress-30 фирмы Struers. Образцы закатывались в цилиндрическую пресс-форму с использованием алмазной суспензии (рисунок 8).

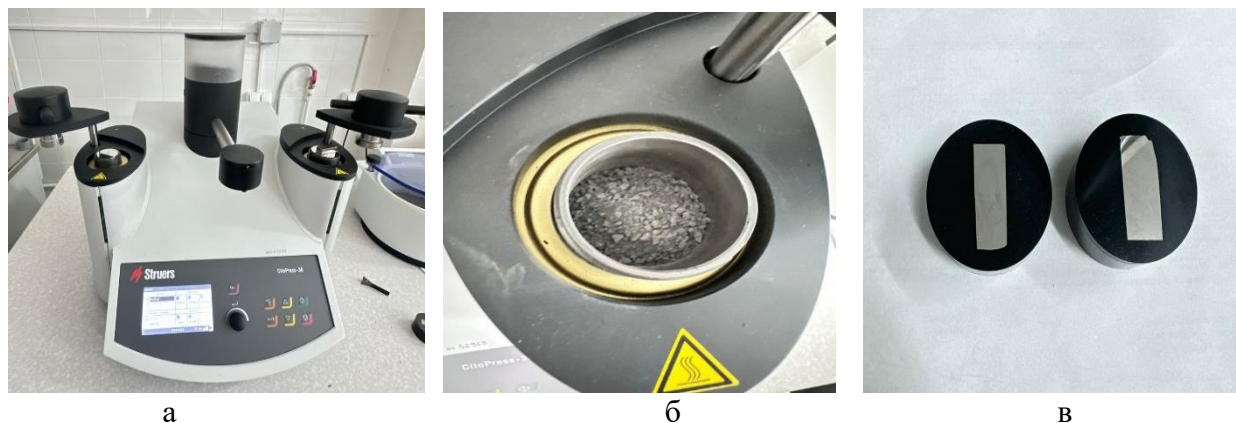


Рисунок 8 – Подготовка образцов для испытаний на износостойкость

Методы исследования образцов с помощью оптического и растрового микроскопов



Рисунок 9 – Лазерно-искровой спектрометр Эланик

В соответствии с рисунком 9, химический и элементный состав стали определялся на портативном лазерно-искровом спектрометре ЭЛАНИК.

Химический состав стали 65Г (ГОСТ 14959-2016) представлен в таблице 10.

Содержание основных элементов в стали 65Г соответствовало стандартным значениям: 0,61% С, 1% Мп, 0,22% Si, 0,16% Ni, 0,1% Cr.

Морфологический анализ и микроструктурные исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе ZEISS EVO-18 по ГОСТ 5639-92 «Стали и сплавы. Методы обнаружения и определения размера зерен» и ГОСТ 23049–84 «Контроль неразрушающий. Методы измерений геометрических параметров микрорельефа поверхности» (рисунок 10).



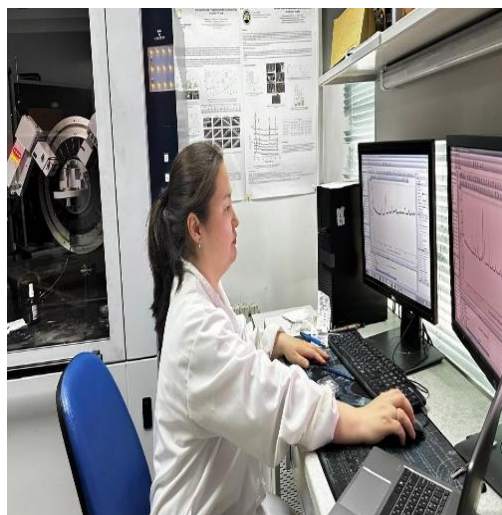
Рисунок 10 – Сканирующий электронный микроскоп ZEISS EVO-18

Микроскоп предназначен для исследования фазового состава, морфологических и структурных особенностей металлов и сплавов при увеличении от 50 до 1 000 000 крат и оснащён встроенной цифровой системой регистрации изображения с программным обеспечением ZEISS SmartSEM, обеспечивающей автоматическую фокусировку, коррекцию астигматизма и точную калибровку масштаба. Управление и обработка данных осуществляются при помощи специализированного программного комплекса ZEISS SmartSEM, включающего модули измерений геометрических параметров микроструктуры, анализа формы и размера зерна, а также построения трёхмерных профилей поверхности.

Для определения *фазового состава* приповерхностных слоёв плазменно-закалённых образцов использовали рентгеновский дифрактометр D8 ADVANCE, Bruker (рисунок 11).



а



б

Рисунок 11 – Рентгеновский дифрактометр D8 ADVANCE (Bruker)

Съёмка рентгенограмм проводилась в диапазоне углов 2θ , охватывающем характерные пики основных структурных фаз стали. Обработка рентгенограмм проводилась с использованием стандартных баз данных JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards), что позволило с высокой достоверностью идентифицировать наличие мартенсита, остаточного аустенита, ферритной составляющей и возможных карбидных включений. Метод рентгеноструктурного анализа обеспечивал оценку степени закалки, характера фазовых превращений и остаточных напряжений в зоне термического воздействия.

Метод определения глубины закаленного слоя



а



б

Рисунок 12 – Микротвердомер Metkon Duroline-M

В соответствии с рисунком 12, определение закаленного слоя проводилось на цифровом микротвердомере Metkon Duroline-M в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 1763-78.

Метод определения глубины закаленного слоя заключался в определении микротвердости по поперечному сечению закаленного образца от поверхности к центру до получения стабильных результатов микротвердости. Измерения проводились с шагом 20 мкм (расстояние между отпечатками превышало диагональ отпечатка в 2,5 раза). За глубину закаленного слоя принимали расстояние от края шлифа до точки, в которой была получена стабильная микротвердость. Обработка данных проводилась с использованием встроенного программного обеспечения прибора, обеспечивающего автоматическое вычисление значения микротвёрдости по диагоналям отпечатка и построение профиля распределения твёрдости по глубине закаленного слоя [87].

Измерение на твердость

Метод Виккерса основан на вдавливании в поверхность образца алмазной четырёхгранной пирамиды с углом при вершине 136° , что обеспечивает получение отпечатка строго геометрической формы и минимальной площади контакта. Благодаря этому измерения могут проводиться как на поверхности, так и по сечению закаленных зон. Данный метод позволяет измерять микротвёрдость на участках с толщиной закалённого слоя в пределах нескольких десятков микрометров, что невозможно при использовании шарика по методу Бринелля. В последнем случае деформация распространяется на значительный объём материала, в результате чего значение твердости отражает усреднённую характеристику не только поверхностного, но и подслоного металла, что снижает точность оценки реального распределения твёрдости по глубине [88].

Измерение твёрдости на поверхности образцов производилось на твердомере макро Виккерса Wilson VH 1150 (рисунок 13) при нагрузке на индентор 30 кг и времени выдержки 15 с. Показатели твёрдости на поверхности образцов измерялись по методу Виккерса, в соответствии с ГОСТ 2999-75 «Металлы. Метод измерения твердости по Виккерсу».



Рисунок 13 – Твердомер макро Виккерса Wilson VH 1150

Твердость по Виккерсу вычисляют по формуле (8):

$$HV = \frac{2P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,854Г \quad (8)$$

где **P** – нагрузка, кгс;

α – угол между противоположными гранями пирамиды при вершине, равной 136°;

d – среднее арифметическое значение длин обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.

Значение твердости прямо коррелирует с пределом прочности при растяжении, так как оба параметра определяются сопротивлением материала пластической деформации. Для большинства термически упрочнённых конструкционных сталей, включая сталь 65Г, такая зависимость описывается эмпирическим соотношением:

$$\sigma_B = k \cdot HV \quad (9)$$

где **σ_B** – временное сопротивление разрыву (МПа);

HV – твердость по Виккерсу;

k – 0,36.

Таким образом, предел прочности для стали 65Г определяется по формуле (10):

$$\sigma_B = 0,36 \cdot HV \quad (10)$$

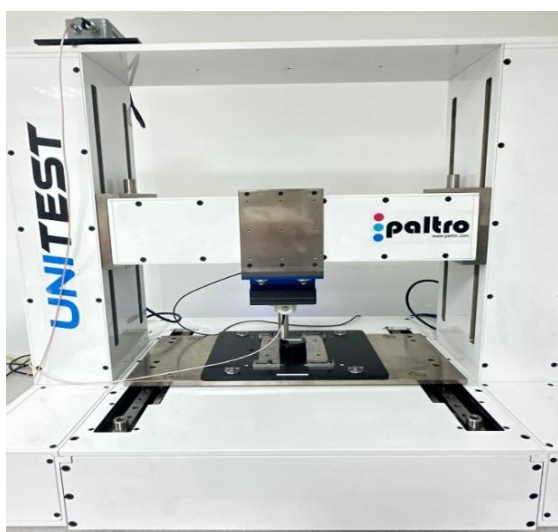
Измерения твердости закалённой стали сразу после закалки позволяет зафиксировать максимальные значения твердости, соответствующие чистому мартенситу. Измерения твердости производились посредством ультразвукового твердомера УЗИТ-3 (рисунок 14) по ГОСТ 9013–59 по методу Роквелла.



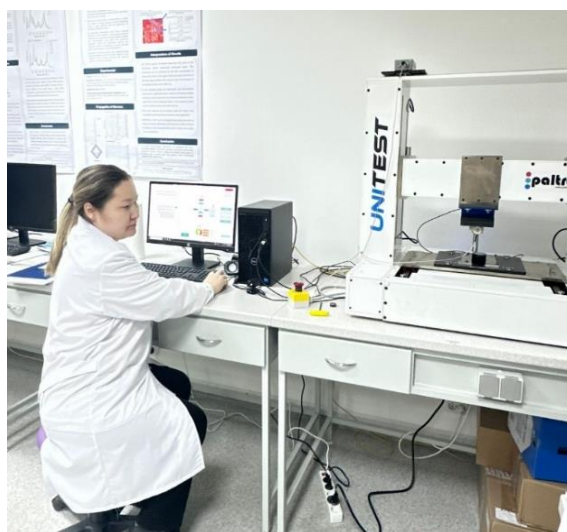
Рисунок 14 – Ультразвуковой твердомер УЗИТ-3

Испытания на износостойкость проводились на Трибометре UNITEST

Paltro (Германия), предназначенном для оценки износостойкости материалов при различных режимах трения (рисунок 15). Данный метод позволяет количественно определить интенсивность изнашивания при трении скольжения и комплексную износостойкость материала в условиях, близких к реальной эксплуатации деталей почвообрабатывающих машин [89, 90]. В ходе испытаний моделировались процессы контактного взаимодействия по схеме «шар–плоскость», где стальной шар изготавливался из твёрдого сплава на основе карбида вольфрама (WC–Co) диаметром 10 мм. Испытания проводились в режиме сухого трения при температуре $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажности $(50 \pm 5)\%$, в воздушной среде. В ходе испытаний шар перемещался по поверхности образца со скоростью 1 мм/с при нагрузке 100 и 150 Н в течение 30 с, что обеспечивало путь трения порядка 30 мм.



а



б

Рисунок 15 – Универсальный трибометр UNITEST Paltro



Рисунок 16 – Оптический микроскоп OLYMPUS GX51

В соответствии с рисунком 16, после завершения испытаний поверхность исследовалась с использованием оптического микроскопа OLYMPUS GX51 при

увеличении 200–500X для определения средней ширины износного трека (b). Для оценки статистической достоверности результатов проводилась серия повторных испытаний (n=10).

Также были проведены полевые испытания на износостойкость и долговечность на базе ТОО «Нур 777 КАС» (Северо-Казахстанская область, Аккайынский район Ивановский сельский округ). Испытания проводились на истираемость по потере массы и контролируемым параметрам лемехов плуга и лап культиватора в условиях среднесуглинистых почв с каменистыми включениями и легкосуглинистых.

Испытания на ударный изгиб проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 9454-78. Применяемый метод – метод испытания на ударный изгиб с измерением величины ударной вязкости. Метод основан на разрушении образца с концентратором посередине одним ударом маятникового копра. Ударные испытания проводили на маятниковом копре КМ-30. Были изготовлены ударные образцы размерами 6,5x11,5x55 мм (рисунок 17).

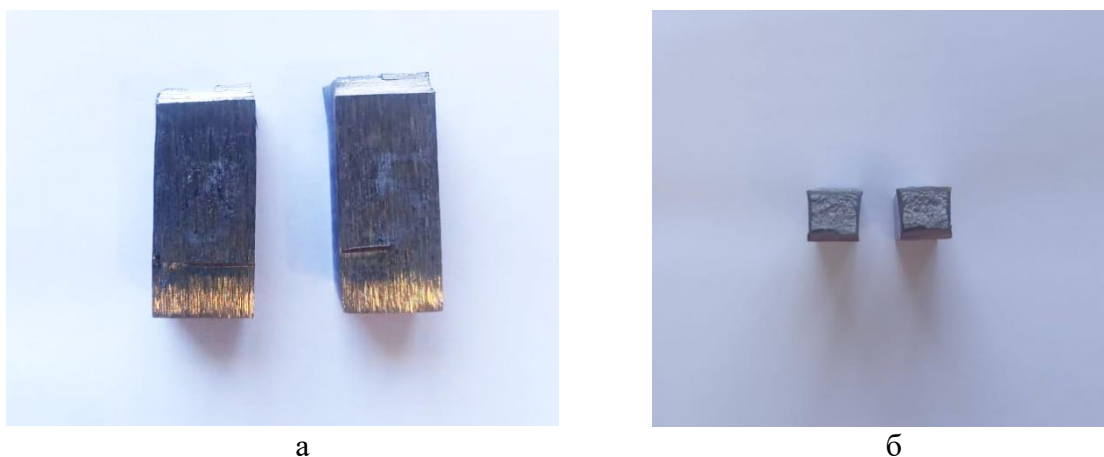


Рисунок 17 – Испытания образцов на ударный изгиб

Усталостную трещину на образцах создавали на вибраторе Дроздовского. При этом относительная длина трещины, λ , изменялась в пределах от 0,27 до 0,65. При нахождении λ применяли формулу (11):

$$\lambda = \frac{\ell}{b} \quad (11)$$

где ℓ – суммарная длина основного надреза и трещины;
 b – ширина образца.

Ударную вязкость рассчитывали по формуле (12):

$$KCT = \frac{A_p}{F} \quad (12)$$

где A_p – работа разрушения, снимаемая со шкалы копра с точностью до $\pm 0,05$ кГ м;

F – площадь живого сечения образца, см².

Оценку ударной вязкости в условиях гарантированной плоской деформации проводили на образцах с двумя дополнительными боковыми V-образными надрезами, глубина которых составляла 1,0 мм. Оценка ударной вязкости на образцах с боковыми надрезами дает возможность определять уровень удельной работы распространения трещины при разрушении в условиях плоско-деформированного состояния (ПДС) [91].

Испытания на изгиб проводились на универсальной тестовой машине для механических испытаний Walter Bai LFM-L10 кН (рисунок 18) по ГОСТ 14019-80. Испытания выполнялись при максимальной нагрузке 10 кН. Образец устанавливался на две опоры с зазором. Нагрузка прикладывалась в средней части образца с постоянной скоростью перемещения траверсы, обеспечивающей равномерное увеличение напряжений. После испытаний осматривали кромки и наружную поверхность изогнутой части. Дополнительно проводилось микроструктурное исследование поверхности излома с использованием оптического микроскопа для выявления наличия трещин, сколов и признаков расслоения материала.

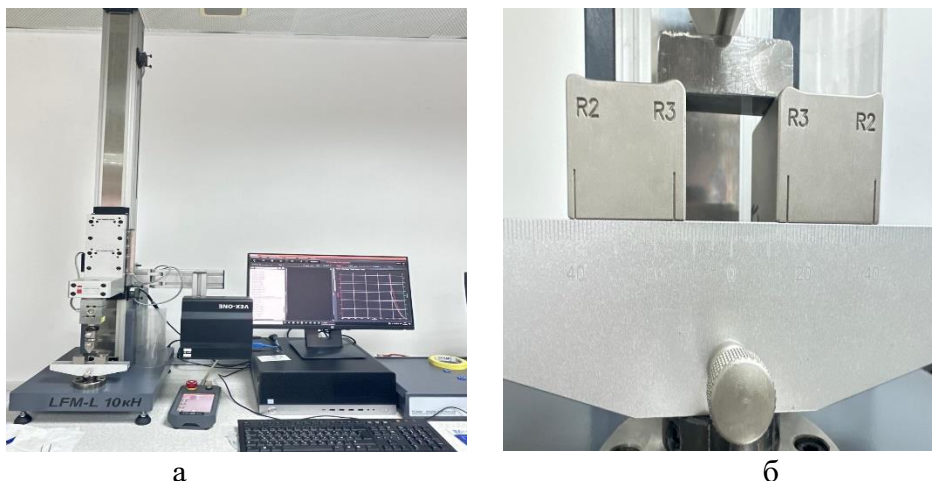


Рисунок 18 – Тестовая машина для механических испытаний Walter Bai LFM-L10

Коррозионные испытания образцов

Для корректной оценки коррозионной стойкости материала важно правильно выбрать показатель коррозии. Широкое применение при проведении лабораторных исследований материалов получили показатели коррозионной стойкости, учитывающие:

- изменение массы образцов;
- количество поглощенного в процессе коррозии кислорода, или выделившегося водорода;
- изменение механических свойств материала в результате коррозии;
- изменение электрического сопротивления материала в результате коррозии;
- глубину развития коррозионного разрушения;
- время, необходимое для развития коррозии на определенной части

поверхности.

При исследовании коррозионного поведения упрочненных образцов стали 65Г был использован весовой метод. Данный метод является наиболее простым в реализации и наглядным для определения коррозионной стойкости материалов. При использовании данного метода скорость коррозии материала характеризуется массовым показателем, который определяет массу прокорродировавшего материала на единице площади за единицу времени [92].

Коррозионную стойкость оценивали проведением ускоренных лабораторных испытаний. Образцами в эксперименте выступали партии закаленных и исходных образцов стали 65Г.

Испытания на коррозию образцов лемеха плуга проводились лабораторным способом. Искусственно создавались условия агрессивной коррозионной среды, в которую был помещен металл.

В качестве коррозионной агрессивной среды использовались растворы: сульфат аммония и аммиачная селитра, так как данные удобрения обладают высокой коррозионной активностью. Пропорции: Сульфат аммония 400 гр на 1 литр воды, Аммиачная селитра 300 гр на 1 литр воды.

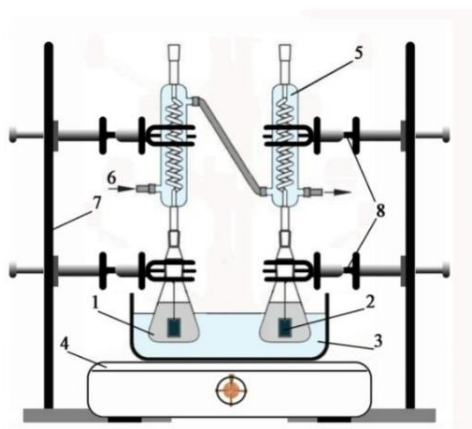
Эти вещества были выбраны в качестве имитаторов удобрений, широко применяемых в сельском хозяйстве, так как они формируют кислую среду при взаимодействии с влагой и провоцируют активную коррозию металлических элементов почвообрабатывающей техники.

Коррозионные испытания проводились в ускоренном режиме, что позволяет в сжатые сроки получить достоверную информацию о поведении материала в агрессивных условиях. Известно, что скорость коррозионных процессов существенно возрастает с увеличением температуры, так как повышенная температура ускоряет электрохимические реакции, способствующие разрушению металла [93].

Исходя из этого, испытания были проведены при температуре 80°C. Данный температурный режим обеспечивает активное протекание коррозионных процессов, характерных для условий эксплуатации почвообрабатывающей техники, особенно в условиях повышенной влажности и воздействия агрохимикатов. При этом температура 80°C остается ниже температур, при которых возможно изменение структуры стали, что исключает термическое влияние на свойства материала, не связанное с коррозией.

Для оценки уровня коррозионной стойкости всех образцов был собран испытательный стенд (рисунок 19). Стенд включал в себя электрическую нагревательную поверхность; цилиндрическую емкость, заполненную водой; две колбы с агрессивной средой. Колбы были снабжены обратным холодильником. Положение колб фиксировалось верхним и нижним держателями штатива. Температура воды контролировалась термометром, установленным рядом с колбой. Продолжительность испытания в агрессивной среде была принята 80 минут. Время испытания выбиралось исходя из условия, чтобы потеря массы испытуемых образцов надежно измерялась. Для каждой партии образцов каждые 24 часа проводилась замена агрессивного раствора на свежий раствор. Поскольку эксперимент проводился в агрессивных горячих

растворах, то для фиксации образцов в колбе использовался провод с полимерной изоляцией, а верхняя часть образцов на месте крепления изолировалась лентой из политетрафторэтилена (рисунки 19, 20). Коррозионным испытаниям подвергались по три образца из каждого вида партии покрытий.



1 – колба с агрессивном раствором; 2 – испытуемый образец; 3 – емкость с водой; 4 – нагревательный элемент; 5 – обратный холодильник; 6 – вода для охлаждения; 7 – штатив; 8 – держатели

Рисунок 19 – Испытательный стенд для определения коррозионной стойкости материалов в агрессивной среде



а



б



в

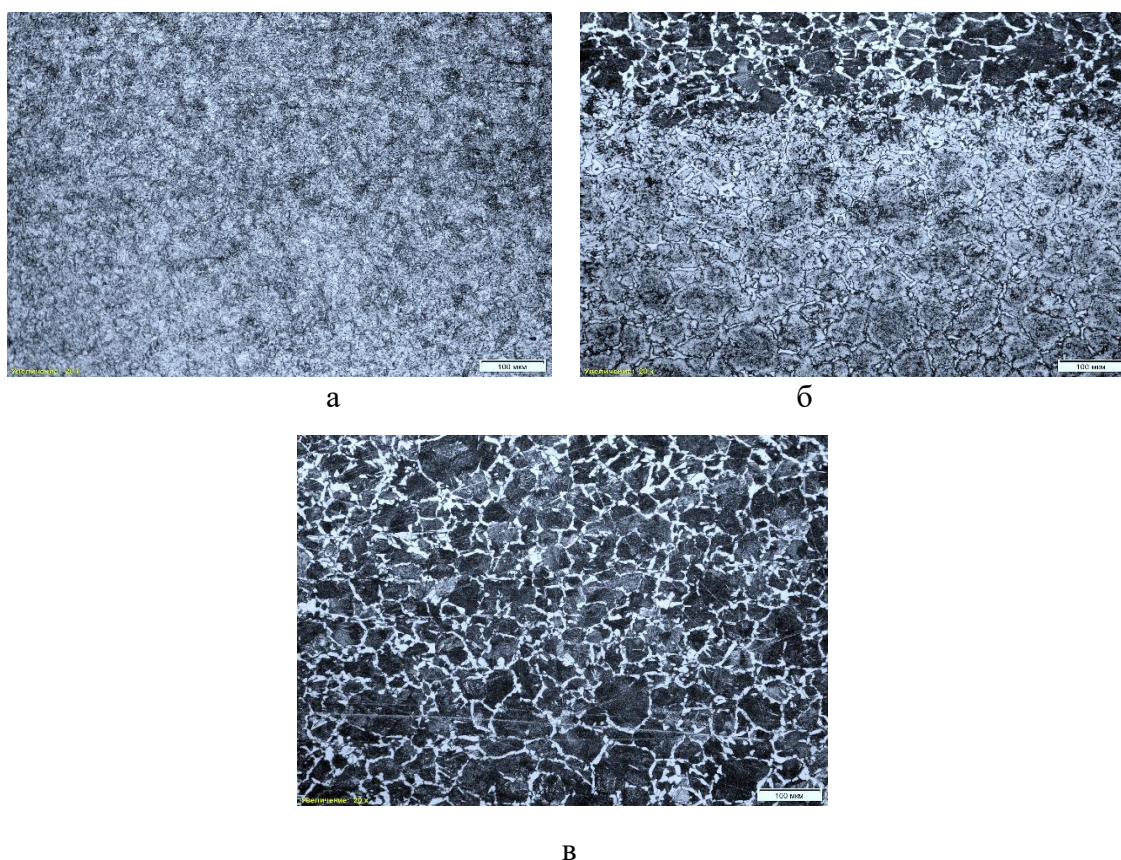
Рисунок 20 – Процесс коррозионных испытаний

После выдержки в коррозионной среде образцы вынимались из колбы и промывались водой. Далее с испытуемых образцов были удалены остатки коррозии. После удаления продуктов коррозии образцы были высушены. Взвешивание массы до испытания и после испытаний проводили на аналитических весах с точностью 0,0001 г. Каждый образец измеряли 3 раза. Были рассчитаны средние арифметические значения масс образцов.

2.3 Микроскопическое и рентгеноструктурное исследование образцов

Для повышения износостойкости, прочности поверхности и эксплуатационных характеристик почворезущих деталей машин важно оценить изменения в микроструктуре и фазовом составе материала после плазменной закали. Эти исследования помогают точно определить долю мартенсита и других фаз в приповерхностных слоях, что критично для оптимизации процесса плазменной закали. Механические свойства (прочность, твердость) плазменно-закаленных деталей определяется формой, размерами, ориентацией зерен (субзерен) и характером распределения их в объеме металла [94].

Исследование микроструктуры проводилось на полированных и протравленных шлифах с использованием оптического микроскопа Axio Observer (ZEISS), обеспечивающего увеличение до 1000X. Анализ фазового состава приповерхностных слоёв плазменно-закалённых образцов был выполнен на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE.



а – закаленный слой; б – зона термического влияния; в – матрица (основной металл)

Рисунок 21 – Электронно-микроскопическая структура стали 65Г, X100

Металлографические (рисунок 21а, 21б, 21в) и рентгеноструктурные исследования (таблица 9) показали, что закаленный слой представляет собой однородную мелкозернистую мартенситную структуру.

Таблица 9 – Фазовый состав приповерхностных слоёв стали 65Г

Слой материала	Фаза	Тип кристаллической решетки	Доля фазы, %
Незакаленный слой	Феррит	Кубическая централизованная	40–45
	Перлит	Орторомбическая	40–45
	Цементит	Ромбическая	10–15
Переходной слой	Мартенсит	Тетрагональная	30–35
	Феррит	Кубическая централизованная	30–35
	Перлит	Орторомбическая	15–20
Закаленный слой	Мартенсит	Тетрагональная	80–90
	Остаточный аустенит	Кубическая централизованная	5–10

Химический состав упроченного слоя соответствовал составу стали с содержанием углерода 0,65%. По мере увеличения глубины наблюдается формирование неоднородной структуры – зоны термического влияния, которая представляет собой мартенсит и перлит. Твердость переходного слоя составляла 400–500 HV, что значительно выше, чем в незакаленном слое. Этот слой играет ключевую роль в снижении градиента твердости и предотвращении трещинообразования, возникающего из-за резкого изменения твердости между закаленным и незакаленным слоями. Затем эта зона переходит в перлитно-ферритную структуру, т.е. в структуру матрицы. В данном состоянии твердость материала составляла 170–200 HV, что подтверждает наличие более мягких и пластичных фаз, таких как феррит и перлит [95].

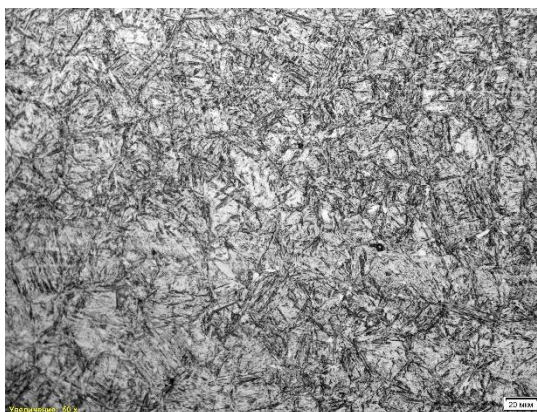


Рисунок 22 - Микроструктура упрочнённого поверхностного слоя стали 65Г после плазменной обработки, X500

На рисунке 22 представлена микроструктура упрочнённого поверхностного слоя стали 65Г после обработки. Анализ микроструктуры показывает формирование однородной мелкодисперсной структуры без выраженных дефектов в виде трещин, пор, несплошностей и участков

локального перегрева. Структурные составляющие распределены равномерно по всему исследуемому объёму, что свидетельствует о стабильности теплового воздействия и равномерности протекания фазовых превращений в процессе обработки.

Полученная структура характеризуется высокой степенью дисперсности и относится к мартенситно-сорбитному типу с элементами тонкодисперсного троостита. Наблюдаемая мелкоигольчатая морфология структуры обусловлена высокой скоростью охлаждения после локального нагрева, характерного для процессов плазменного упрочнения. Формирование мелкодисперсного мартенсита связано с интенсивным тепловым циклом, обеспечивающим быстрое аустенитное превращение и последующее самозакаливание поверхностного слоя.

Следует отметить отсутствие выраженной феррито-перлитной полосчатости и крупных карбидных включений, что указывает на эффективное измельчение исходной структуры материала. Подобное структурное состояние способствует повышению твёрдости и сопротивления абразивному износу вследствие увеличения плотности дислокаций, дисперсионного упрочнения и формирования высокодисперсной мартенситной матрицы.

Мелкодисперсное строение поверхностного слоя также свидетельствует об отсутствии перегрева материала в процессе обработки. Это является важным фактором, поскольку чрезмерный перегрев приводит к росту зерна, снижению ударной вязкости и возникновению внутренних дефектов. В рассматриваемом случае структура характеризуется структурной однородностью и стабильностью, что положительно влияет на эксплуатационные свойства материала.

Сформированная структура обеспечивает повышение комплекса механических и эксплуатационных характеристик, включая увеличение твёрдости, износостойкости, контактной выносливости и сопротивления пластической деформации. Кроме того, наличие мелкодисперсной мартенситной структуры способствует формированию благоприятных остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое, что повышает сопротивление зарождению и развитию усталостных трещин при ударно-абразивном нагружении.

Таким образом, проведённый металлографический анализ подтверждает, что в результате плазменной закалки сформировался качественный упрочнённый поверхностный слой с равномерной мелкодисперсной структурой мартенситно-сорбитного типа, обеспечивающей повышение эксплуатационной долговечности исследуемого материала.

Выводы к разделу

Проведённый анализ показал, что почворезущие детали сельскохозяйственных машин требуют материалов с высокой прочностью, твердостью, износостойкостью и вязкостью. Наиболее подходящим материалом для этих деталей является сталь 65Г, которая сочетает оптимальные механические свойства и хорошую технологичность при термической обработке.

Комплексное исследование образцов лемехов и лап культиваторов, упрочнённых плазменной закалкой, проводилось с применением современного аналитического оборудования, что обеспечило высокую достоверность результатов. Использование методов металлографического анализа, рентгеноструктурного анализа, измерений микротвёрдости и испытаний на износ позволило установить закономерности изменения структуры и свойств стали 65Г под действием термического упрочнения. Установлено, что наиболее информативными характеристиками являются распределение твёрдости по глубине закалённого слоя и морфология мартенситной структуры.

Микроскопические и рентгеноструктурные исследования показали, что в закалённом слое стали 65Г формируется мелкозернистая мартенситная структура, обеспечивающая высокую твердость и износостойкость. Рентгеновский анализ также выявил остаточный аустенит и мартенсит, что подтверждает эффективность плазменной закалки для улучшения прочности и износостойкости при сохранении вязкости сердцевины.

Таким образом, проведённый анализ показал, что плазменная закалка стали 65Г обеспечивает оптимальное сочетание твердости, износостойкости, прочности и вязкости, что делает её наиболее рациональным материалом для почворежущих деталей сельскохозяйственных машин, работающих в условиях сложных механических и абразивных воздействий.

Вместе с тем эффективность плазменной обработки в значительной степени определяется выбором технологических параметров процесса, характеристиками применяемого оборудования и особенностями теплового воздействия на тонкостенные элементы конструкции. В связи с этим в следующем разделе выполнено обоснование оптимальных режимов плазменной обработки тяжело нагруженных деталей почвообрабатывающих машин.

3 ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ТЯЖЕЛО-НАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН

3.1 Особенности поверхностной плазменной обработки тяжело-нагруженных деталей почвообрабатывающих машин

Проблема преждевременного выхода из строя рабочих органов почвообрабатывающей техники остаётся одной из ключевых в аграрном машиностроении, особенно при эксплуатации в условиях высокоабразивных почв. Среди сменных деталей рабочих органов почвообрабатывающих машин для экспериментальных исследований, направленных на снижение интенсивности изнашивания выбраны лемехи плугов и стрелчатые лапы культиваторов как наиболее тяжёло нагруженные и быстроизнашивающиеся.

С учётом необходимости увеличения эксплуатационного ресурса без существенного роста массы конструкции, приоритетным направлением повышения износостойкости является применение технологий поверхностного упрочнения, в частности плазменной обработки, реализуемой с использованием установки УДГЗ-200 [96].

Лемехи плугов и культиваторные лапы, как правило, изготавливаются из конструкционных сталей, преимущественно марок 65Г, 40Х и 30ХГСА. Толщина материала в зонах максимальных нагрузок у данных деталей, как правило, не превышает 10–20 мм. Геометрические параметры лемехов зависят от конструктивного исполнения, типа плуга и условий эксплуатации. Так, в зонах интенсивного износа, включая переднюю режущую кромку, толщина лемеха может достигать 20 мм. Для лёгких и средних почв литые и штампованные лемехи имеют толщину порядка 6–10 мм, тогда как при работе в тяжёлых условиях (сухие, каменистые или уплотнённые почвы) данный показатель увеличивается до 10–16 мм. Стрелчатые лапы культиваторов стандартного исполнения характеризуются толщиной 6–10 мм, в то время как у глубокорыхлительных и тяжёлых чизельных культиваторов толщина рабочих органов может достигать 20 мм. К массивным элементам с толщиной более 20 мм относятся оси, втулки, корпуса лемешных узлов, стойки глубокорыхлителей, муфты, скобы, элементы рам тяжёлых машин и колесные пары [97].

При закалке тонкостенных деталей существенно возрастает вероятность коробления, деформации режущих кромок и возникновения значительных остаточных напряжений, что, в свою очередь, повышает риск трещинообразования. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка рациональных режимов поверхностной плазменной обработки, обеспечивающих требуемую глубину упрочнённого слоя, равномерность температурного поля по сечению детали, минимальный уровень остаточных напряжений и повышение износостойкости без ухудшения исходных прочностных характеристик материала. При этом при выборе режимов необходимо учитывать геометрию изделия, теплофизические свойства стали, интенсивность теплоотвода и специфику теплового цикла, характерную для обработки элементов малой толщины [98].

При недостаточной жёсткости детали и локальном высокоинтенсивном нагреве в зоне плазменного воздействия без фиксации возможно развитие изгибных деформаций вдоль продольной оси, что особенно критично для плужных лемехов, где геометрическая точность определяет работоспособность изделия. Существенные температурные градиенты также могут способствовать формированию микротрещин в зоне режущей кромки. Для снижения указанных рисков целесообразно использование температурных ограничений, средств контроля теплового состояния и адаптивного управления режимами закалки. Чрезмерная мощность теплового воздействия приводит к перегреву локальной зоны и расширению области термического влияния, что нарушает баланс термических деформаций и вызывает развитие внутренних напряжений. Лапа культиватора, особенно стрельчатая, вследствие изогнутой формы испытывает деформации на изгиб и срез, а также абразивное истирание кромки [99].

Плазменная обработка деталей малой толщины требует высокой точности настройки технологических параметров, поскольку уменьшение толщины материала значительно повышает его чувствительность к тепловым и механическим воздействиям. При использовании установки УДГЗ-200 необходимо учитывать следующие особенности процесса: высокая температура плазменной дуги (до 20 000°C), способная вызвать прожог или деформацию тонких участков; необходимость ограничения глубины термического влияния с целью предотвращения нежелательных структурных изменений; обеспечение равномерного прогрева и минимизация температурных градиентов, особенно при обработке легированных сталей; стабильность параметров дуги и строгий контроль расхода газа и силы тока для обеспечения воспроизводимости качества упрочнения.

При корректно выполненной плазменной закалке поверхность приобретает характерные цвета побежалости, преимущественно тёмно-синие и чёрно-серые оттенки. Появление красновато-коричневых тонов свидетельствует о нарушении газовой защиты зоны обработки, что может быть обусловлено недостаточным расходом аргона, смещением электрода в сопле плазмотрона, увеличенной длиной дуги либо загрязнением поверхности детали [100].

Нарушения режимов закалки способны привести к короблению, локальному перегреву, образованию микротрещин и снижению прочности в зонах крепления. В связи с этим поверхностная плазменная обработка должна обеспечивать не только повышение износостойкости, но и сохранение геометрической стабильности и механической целостности детали. В сравнении с упрочнением массивных элементов, обработка тонкостенных изделий сопряжена с повышенными технологическими рисками, однако при корректной настройке оборудования и соответствующей подготовке деталей позволяет достигать высокой надёжности и значительного эксплуатационного эффекта.

Таким образом, строгое соблюдение технологических параметров, предварительная оценка рисков, обоснованный выбор режимов обработки и надлежащая подготовка поверхности, а также внедрение систем температурного мониторинга и автоматизированного управления перемещением плазменной дуги позволяют существенно снизить вероятность возникновения остаточных

напряжений, деформаций и других критических дефектов при упрочнении тонкостенных, тяжело нагруженных деталей почвообрабатывающих машин. Комплексное управление тепловложением, скоростью и траекторией движения дуги обеспечивает равномерное распределение температуры и стабилизацию структуры материала по сечению изделия [101].

Плазменная закалка дугой прямого действия с использованием установки УДГЗ-200 представляет собой эффективный и технологически перспективный метод обработки металлических материалов, получивший широкое распространение в различных отраслях промышленности и научных исследований. Применение данного метода позволяет существенно повысить долговечность деталей и оптимизировать процессы их изготовления и восстановления.

По сравнению с альтернативными способами упрочнения, включая наплавку и напыление износостойких материалов, плазменная закалка обладает рядом принципиальных преимуществ. В частности, использование твёрдосплавных покрытий, таких как стеллиты, широко применяемых, например, в нефтехимической арматуре, сопряжено с рядом технологических ограничений, связанных с хрупкостью материала, сложностью его подачи в дугу и ускоренным износом электродов [102]. Кроме того, увеличение толщины наплавленного слоя приводит к росту сопротивления движению почворезущих органов, нарушению агротехнических требований, увеличению нагрузок на машину и перерасходу топлива.

Несмотря на активное развитие технологий напыления и наплавки с первой половины XX века, их применение в отношении почвообрабатывающих органов ограничено высокой стоимостью материалов, значительными потерями наплавленного вещества и увеличением толщины рабочих элементов [103, 104]. Полная объемная закалка деталей также является нецелесообразной, поскольку приводит к избыточной хрупкости изделия, что в условиях неоднородного грунта вызывает сколы, либо, напротив, при недостаточной твёрдости – к пластической деформации и росту износа [105].

Широко применяемые в настоящее время упрочняющие наплавки с использованием специальных электродов и сплавов (Т-590, ОСИ-6, Х12, износостойкие чугуны, твёрдые сплавы и керамические материалы) позволяют повысить стойкость деталей, однако зачастую ухудшают их проникающую способность и нарушают агротехнические требования, что негативно отражается на качестве обработки почвы и урожайности сельскохозяйственных культур [106]. Дополнительным ограничением является их высокая стоимость по сравнению с плазменной закалкой.

В отличие от указанных методов, плазменное упрочнение не приводит к увеличению толщины рабочей части, сохраняет упругие и пластические свойства материала и может быть реализовано непосредственно в условиях сельскохозяйственного предприятия без значительных технологических затрат.

Таким образом, анализ эксплуатационной практики показывает, что поверхностная плазменная закалка является рациональным способом повышения ресурса тяжело нагруженных и быстроизнашивающихся деталей

почвообрабатывающих машин, сочетая технологическую универсальность, доступность, экологичность и экономическую эффективность. Данный вид упрочняющей термической обработки не изменяет параметры шероховатости поверхности, легко интегрируется в технологический процесс восстановления деталей, может использоваться в качестве финишной операции и обеспечивает существенное увеличение эксплуатационной стойкости почворежущих элементов машин.

3.2 Анализ параметров установки УДГЗ-200 и выбор оптимальных режимов

Поверхностную плазменную обработку плужных лемехов и лап культиваторов из марганцовистой стали 65Г (ГОСТ14659-2004) проводили на мобильной сертифицированной установке ручной плазменной закали УДГЗ-200 с регулятором расхода плазмообразующего газа (аргона) [107]. Плазменная закалка проводилась на базе ООО «Научно производственная фирма «Механик», город Екатеринбург, Россия. Установка для плазменной закали дугой прямого действия УДГЗ-200 и схема соединений плазмообразующего газа (аргона), подачи и слива охлаждающей воды, подвода тока и управления технологического плазмотрона представлены на рисунках 23, 24 и 25.

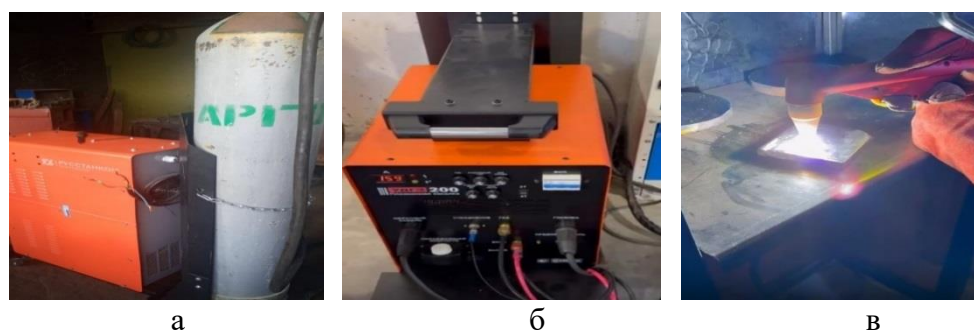
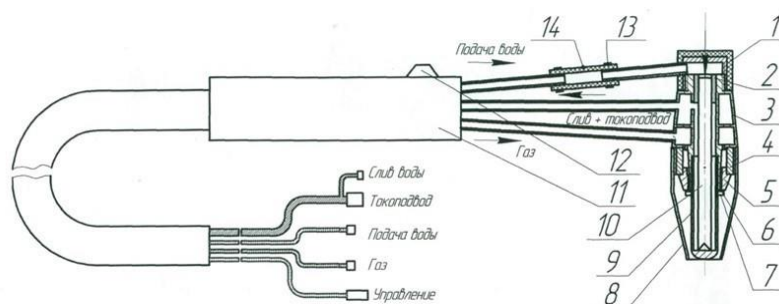


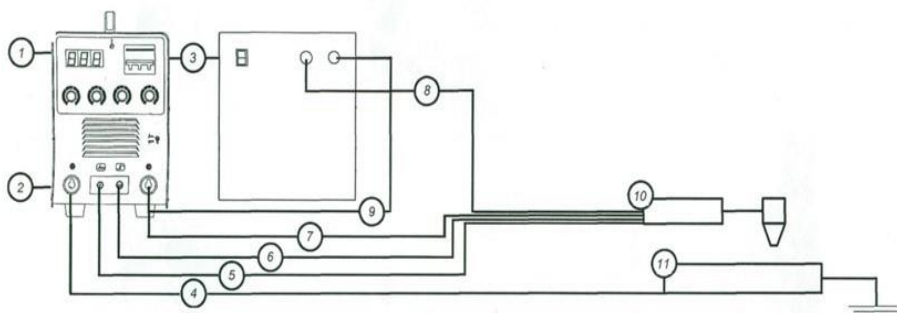
Рисунок 23 – Установка для плазменной закали дугой прямого действия УДГЗ-200



1 – гайка; 2, 6 – уплотненная прокладка; 3 – корпус; 4 – резьбовая втулка; 5 – рассекатель; 7 – гайка для электрода; 8 – керамическое сопло; 9 – электрод; 10 – трубка; 11 – ручка; 12 – кнопка; 13 – хомут; 14 – соединительный рукав

Рисунок 24 – Схема соединений плазмообразующего газа (аргона), подачи и слива охлаждающей воды, подвода тока и управления технологического плазмотрона

Установка УДГЗ-200 работает на основе создания плазменной дуги прямого действия между обрабатываемой деталью и неподвижным электродом. Это приводит к нагреву детали до температуры закалки, что обеспечивает возможность значительного повышения ее твердости и износостойкости [108]. Однако, наиболее важным преимуществом данного метода является возможность точного контроля параметров обработки, что позволяет оптимизировать процесс в зависимости от специфики детали и материала [109]. На рисунке 24 представлена схема соединений установки плазменной закалки УДГЗ-200.



1 – сетевой кабель; 2 – подвод плазмообразующего газа к установке; 3 – кабель питания блока охлаждения; 4 – кабель обратного провода; 5 – рукав подачи газа к плазмотрону; 7 – рукав слива воды и токоподвод; 8 – рукав воды к плазмотрону; 9 – рукав слива воды; 10 – корпус плазмотрона; 11 – изделие

Рисунок 25 – Схема соединений установки плазменной закалки УДГЗ-200

Данная схема обеспечивает устойчивую плазменную дугу, локализованное упрочнение и высокую повторяемость обработки изделий из стали, чугуна или твёрдого сплава.

В таблице 10 приведены основные технологические параметры установки УДГЗ-200.

Таблица 10 – Технологические параметры поверхностной плазменной обработки на установке УДГЗ-200

Параметр	Значение
1	2
Источник нагрева	Плазменная дуга прямого действия
Тип электрода	Вольфрамовый, неплавящийся, Ø 3–4 мм
Сила тока, А	100–220
Напряжение дуги, В	40–100
Мощность обработки, кВт	40–60
Скорость перемещения плазмотрона, мм/с	2–6
Расстояние от сопла до поверхности детали, мм	3–10
Температура нагрева зоны ППЗ, °С	900–1200
Скорость охлаждения, °С/с	>100
Рабочий газ	Аргон (Ar)
Расход плазмообразующего газа, л/мин	7–12

Продолжение таблицы 10

1	2
Глубина упрочнённого слоя, мм	0,8–2,0
Микротвёрдость после ППЗ, HV	750–850
Микроструктура	Игольчатый мартенсит
Температура в зоне ППЗ, °C	До 1250
Продолжительность воздействия на участок, сек	0,3–1,2
Шероховатость поверхности (Ra), мкм	3,2–6,3

Технологические параметры поверхностной плазменной закали дугой прямого действия на установке УДГЗ-200 оптимально подходят для упрочнения почвообрабатывающих деталей. Внешний вид плазменно-закаленных деталей представлен на рисунке 26.



а



б

Рисунок 26 – Внешний вид плазменно-закаленной лапы культиватора и лемеха плуга

Отличительной особенностью и бесспорным преимуществом установки для проведения поверхностной плазменной закали является то, что она обеспечивает без контактный поджог дуги с плавным нарастанием и регулированием тока закали [110, 111]. Конструктивное исполнение плазматрона рассчитано на работу в диапазоне токов 100–200 А, что является достаточным для осуществления процессов локального поверхностного упрочнения металлических материалов. Для обеспечения стабильного теплового режима плазматрон оснащён системой жидкостного охлаждения закалочной горелки, функционирующей при давлении охлаждающей среды порядка 3,2 кг/см² и расходе до 7 л/мин.

Интенсивный локальный нагрев с последующим ускоренным охлаждением, скорость которого превышает 100°С/с, создаёт условия для формирования мелкодисперсной игольчатой мартенситной структуры с уровнем микротвёрдости до 850 HV без необходимости проведения дополнительной термической обработки. Толщина упрочнённого слоя в пределах 0,8–2,0 мм обеспечивает эффективную защиту поверхностных зон, подверженных наибольшему износу, при сохранении прочностных и пластических свойств сердцевины материала. Применение аргона в качестве плазмообразующего газа в соответствии с требованиями ГОСТ 10157–93 исключает окислительные

процессы на поверхности, а малая продолжительность теплового воздействия, не превышающая 1,2 с, способствует повышению производительности обработки без риска возникновения остаточных деформаций. Совокупность указанных факторов определяет высокую технологическую и экономическую целесообразность применения данного метода при упрочнении деталей сельскохозяйственной техники.

При выборе рациональных режимов плазменной закалки стали 65Г было проведено исследование влияния ключевых технологических параметров процесса, включая мощность плазменной дуги, расстояние между выходным срезом сопла плазмотрона и обрабатываемой поверхностью, скорость перемещения источника тепла, расход плазмообразующего газа (аргона), а также шаг между упрочняемыми дорожками [112].

Особенности термического упрочнения деталей малой толщины, к которым относятся плужные лемехи и лапы культиваторов, обуславливают необходимость строгого соблюдения допустимых режимов теплового воздействия. Экспериментально установлено, что при достижении предельных значений технологических параметров наблюдаются негативные явления, включая коробление тонкостенных заготовок, признаки межкристаллитного разрушения поверхностного слоя, а также формирование зон локального оплавления и трещин. Указанные результаты подтверждают важность научно обоснованного подбора режимов плазменной закалки при упрочнении тонкостенных элементов, эксплуатируемых в условиях повышенных нагрузок. На рисунке 26 представлена деталь с макроплавлением.



Рисунок 27 – Макроплавление стали 65Г

Неравномерная по ширине дорожка с бело-синим налетом показывает «непрокалку» вследствие высокого тока или высокой скорости перемещения плазмотрона.

В связи с этим в технологических режимах установкой УДГЗ-200 при плазменной закалке деталей малой толщины используются пониженные уровни теплового воздействия, например уровень тока плазменной дуги составлял 100-180 А, при напряжении 55 В. Скорость движения плазмотрона составляла 4-8 мм/с, (скоростью перемещения дуги поддерживалось запотевание поверхности под дугой, но при этом не допускалось макроплавление), расход плазмообразующего газа варьировался в пределах 7,0-9,0 л/мин, расстояние

между срезом сопла плазмотрона и обрабатываемой поверхностью составляло 6 мм, уровень тока плазменной дуги составлял 100-200 А при напряжении 55 В. Медный электрод с коническим концом, диаметр керамического сопла 9 мм. Длина дуги 15-20 мм. Наложение дорожек шагом 7-12 мм; при этом перекрывались срединные, наиболее темные, части дорожек.

Исследования проводились с учетом особенностей плазменной обработки тонкостенных изделий, такими как лемехи плугов и стрельчатые лапы культиваторов, их толщина не превышает 7-20 мм [113]. При этом марка и химический состав стали 65Г, а также требования к качеству поверхности и профиль поверхности соответствовали ГОСТ 14959-79.

Плазменная закалка проводилась в ООО «Научно-производственной компании «Механик», город Екатеринбург, Россия.

В комплектность установки плазменной закалки УДГЗ-200 входит регулятор расхода газа с указателем расхода АР-40, который предназначен для понижения давления газа, поступающего из баллона и автоматического поддержания постоянным заданного расхода.

Основными параметрами режима плазменной закалки являются сила тока плазменной дуги, напряжение дуги, тип и расход плазмообразующего газа, диаметр плазмообразующего сопла, расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности, скорость перемещения плазмотрона, погонная тепловая энергия, а также скорость нагрева и охлаждения поверхностного слоя металла.

Выбор газа, формирующего плазменную среду, относится к числу определяющих факторов, влияющих на энергетические, тепловые и металлургические параметры процесса поверхностного плазменного упрочнения. В рамках настоящего исследования в качестве плазмообразующей среды был применён аргон, что обусловлено совокупностью его физических, термодинамических и химических характеристик. Аргон представляет собой инертный одноатомный газ, обладающий высокой способностью к ионизации; величина его энергии ионизации составляет 15,76 эВ. Данное свойство обеспечивает устойчивое и воспроизводимое горение плазменной дуги в широком диапазоне рабочих токов, характерных для процессов плазменной закалки, в частности 50–200 А.

Использование аргона позволяет формировать стабилизированный и пространственно локализованный тепловой поток, необходимый для равномерного нагрева поверхностного слоя стали до температур аустенитизации, находящихся в интервале 850–1100°C, без перехода в режим интенсивного поверхностного оплавления [114].

В отличие от классических методов термической обработки, при которых требуемая скорость охлаждения достигается за счёт погружения нагретой детали в охлаждающую среду (воду, масло и др.) либо подачи жидкости непосредственно на разогретую поверхность, при плазменной закалке необходимый режим охлаждения обеспечивается иным механизмом. Перемещение плазмотрона по поверхности изделия осуществляется с такой скоростью, при которой достигается критическая скорость закалки [115, 116]. При этом охлаждение происходит с чрезвычайно высокой интенсивностью за

счёт малого объёма металла, подвергаемого нагреву. Локальный характер теплового воздействия высокоэнтальпийной плазменной струи принципиально отличает данный способ от традиционных методов нагрева и обеспечивает быстрый теплоотвод в массив детали. В результате процесс закалки реализуется без применения внешних охлаждающих сред, таких как вода или масло.

При упрочнении тонкостенных изделий методом поверхностной плазменной закалки особое значение приобретает скорость перемещения плазмотрона, поскольку именно этот параметр в значительной степени определяет структуру, уровень твёрдости и глубину сформированного упрочнённого слоя. Теплофизические характеристики низкотемпературной плазмы создают условия для реализации закалки в твёрдом состоянии, обеспечивая формирование упрочнённого поверхностного слоя стальных деталей без расплавления материала.

Согласно Короткову В.А. [117], начальную стадию микрооплавления (так называемое «вспотевание» закаливаемой поверхности) при ручной плазменной закалке мобильной установкой УДГЗ-20 можно фиксировать визуально с использованием сварочного фильтра.

Согласно разработанной теплофизической модели (в основе которой заданы параметры факела плазмы, обеспечивающие упрочнение у рабочей поверхности плужного лемеха при плазменной закалке), на поверхности закаливаемого изделия необходимо поддерживать минимальный перегрев металла. Величина допустимого перегрева при этом не должна превышать 40–50°C. Следует отметить, что геометрия и функциональное назначение режущей части плужных лемехов и стрелчатых лап культиваторов являются сходными, что позволяет рассматривать их в рамках единого подхода. Температурные характеристики плавления различных марок сталей, включая сталь 65Г, подробно описаны в специализированных источниках.

При упрочнении рабочих поверхностей таких деталей, как лемехи плугов и лапы культиваторов, для реализации режима контролируемого микрооплавления необходимо выполнение двух основных температурных условий. Во-первых, температура непосредственно на поверхности должна незначительно превышать температуру ликвидуса обрабатываемой стали, что обеспечивает интенсивный тепловой приток и инициирует процесс поверхностного оплавления. Во-вторых, в переходной зоне между упрочняемым слоем и основным металлом требуется формирование температурного режима, при котором в процессе нагрева температура превышает критическую точку A_{c3} (порядка 900°C), обеспечивая полную аустенитизацию материала, а при последующем охлаждении происходит понижение температуры ниже точки начала мартенситного превращения T_M , составляющей приблизительно 230–250°C.

Спецификой плазменной обработки является исключительно высокая скорость протекания тепловых процессов, что существенно осложняет прямой инструментальный контроль температурных полей в объёме детали. В связи с этим практическая реализация требуемых термических условий основывается на полуэмпирических методах, включающих расчётную оценку температур в

поверхностных и приповерхностных слоях. В частности, считается, что при выполнении следующих условий обеспечивается корректное формирование упрочнённого слоя: температура на поверхности превышает температуру ликвидуса стали (порядка 1500–1550°C); на глубине 2–3 мм температура достигает значений выше A_{c3} (~900°C); в слое заданной толщины, составляющей около 2 мм, реализуется полная аустенитизация материала.

Согласно данным, приведённым в работе [96], при линейной скорости перемещения плазмотрона 20 мм/с вдоль обрабатываемой поверхности лемеха температура на поверхности достигает 1530–1550°C, тогда как на глубине 2 мм она удерживается на уровне порядка 850°C в течение 1,5–2,0 с. Указанное распределение температур формирует выраженный температурный градиент, создающий условия для полной аустенитизации поверхностного слоя стали до начала мартенситного превращения при последующем охлаждении.

В углеродистых сталях процесс образования мартенсита активизируется при снижении температуры ниже точки T_M (230–250°C) при условии обеспечения скорости охлаждения, превышающей 150°C/с. В условиях плазменной закалки достигаются следующие значения скорости охлаждения: на поверхности – 700–800°C/с, на глубине порядка 2 мм – 100–120°C/с. Таким образом, в слое толщиной до 2 мм реализуются оптимальные условия для формирования мартенситной структуры. За пределами указанной зоны формируются переходные структурные состояния, представленные смесями мартенсита, троостита и сорбита, что подтверждается результатами металлографических исследований и литературными данными [118].

Отличительной особенностью плазменной закалки является экстремально высокая интенсивность как нагрева (порядка 1500–3000°C/с), так и охлаждения (до 700–800°C/с), что приводит к смещению температур фазовых превращений в область более высоких значений. Указанный эффект способствует существенному измельчению зерна и, как следствие, заметному повышению твёрдости сформированного упрочнённого слоя [119].

Для анализа влияния кинематических параметров процесса плазменной обработки на характеристики упрочнённой зоны была исследована зависимость глубины закалённого слоя от скорости перемещения плазмотрона, результаты которой приведены в таблице 11. Экспериментальные исследования выполнялись при фиксированных значениях силы тока плазменной дуги, равных 140 А, и расстояния от выходного среза сопла плазмотрона до обрабатываемой поверхности 6 мм, что позволило минимизировать влияние энергетических и геометрических факторов и сосредоточить внимание на кинематике процесса плазменной закалки.

Таблица 11 – Влияние скорости перемещения плазмотрона на глубину закалённой зоны

Скорость перемещения, v (мм/с)	2	4	6	8	10	12	14
Глубина упрочнённого слоя, h (мм)	1,20	1,23	1,18	1,05	0,88	0,72	0,60

Результаты таблицы 11 показывают, что глубина упрочнённого слоя существенно зависит от скорости перемещения плазмотрона. При минимальной исследованной скорости 2 мм/с глубина закалки достигает максимального значения 1,32 мм. Увеличение скорости до 4 и 6 мм/с приводит к постепенному снижению глубины упрочнённого слоя до 1,23 мм и 1,18 мм соответственно, что является оптимальным параметром. При средних скоростях 8–10 мм/с глубина зоны закалки уменьшается более заметно, составляя 1,05 мм и 0,88 мм, что указывает на сокращение времени теплового воздействия на поверхность. При высоких скоростях перемещения 12 и 14 мм/с глубина закалки снижается до 0,72 мм и 0,60 мм, соответственно.

Таким образом, наблюдается обратная зависимость глубины упрочнённого слоя от скорости перемещения плазмотрона: повышение скорости перемещения на каждые 2 мм/с в диапазоне 2–14 мм/с приводит к снижению глубины закалки в среднем на 0,11–0,15 мм.

В последующем эксперименте анализировали влияние тока плазменной дуги на формирование твёрдости закаленной поверхности.

Таблица 12 – Зависимость твёрдости поверхности от тока плазменной дуги

Сила тока, I (А)	60	80	95	115	140	160	180	200
Твёрдость поверхности, HV ₃₀	549	581	608	663	700	781	829	874

В таблице 12 приведена зависимость твёрдости поверхности от тока плазменной дуги. С увеличением силы тока наблюдается существенный рост твёрдости поверхности, что обусловлено повышением температуры нагрева и увеличением скорости охлаждения. В диапазоне токов 95–160 А формируется оптимальное сочетание высокой твёрдости и стабильности процесса, соответствующее формированию мартенситной или мартенситно-бейнитной структуры. При токах выше 160 А достигаются максимальные значения твёрдости, однако возрастает вероятность перегрева и поверхностных дефектов.

Далее была исследована зависимость глубины зоны закалки от силы тока плазменной дуги. Эксперименты проводились при фиксированных значениях диаметра плазмобразующего сопла ($d_c=4$ мм) и расстояния от сопла до обрабатываемой поверхности ($s=2$ мм), что позволило выявить закономерности изменения глубины закалки при изменении тока дуги.

Таблица 13 – Зависимость глубины зоны закалки от тока плазменной дуги

I, А	100	110	120	130	140	150	160	170	180	200
Глубины зоны закалки h, мм	0,02	0,38	0,70	1,03	1,22	1,17	0,84	0,60	0,48	0,31

Из таблицы 13 и рисунка 28 видно, что с увеличением тока плазменной дуги наблюдается сначала рост глубины зоны закалки, достигая максимума, а затем снижение глубины при дальнейшем увеличении тока. При токах 100–140 А наблюдается устойчивый рост глубины зоны закалки, что свидетельствует об эффективном процессе нагрева материала и более глубоким проникновением

тепла. С 140 А до 200 А глубина зоны закалки начинает уменьшаться. Это может указывать на насыщение материала теплом, при котором дальнейшее увеличение тока не приводит к увеличению глубины закалки, а наоборот, возможно из-за перегрева материала или других факторов процесс закалки ослабевает.

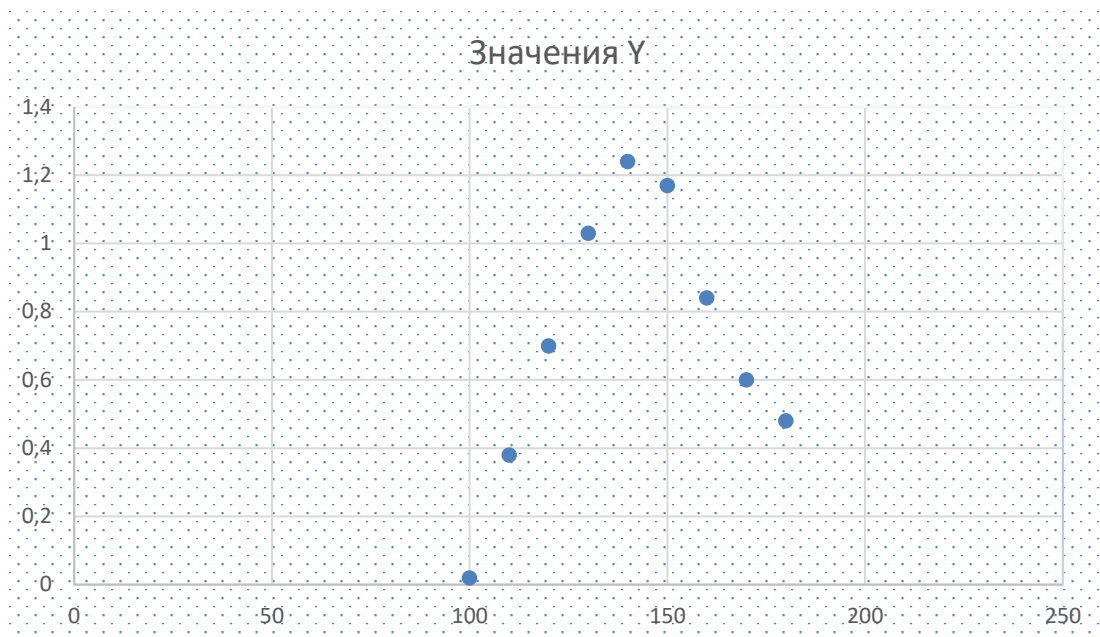


Рисунок 28 – Зависимость глубины зоны закалки от тока плазменной дуги

Анализ таблицы 13 показывает, что для плазменной закалки стали 65Г на установке УДГЗ-200 существует оптимальная зона режимов, при которых достигается максимальный эффект упрочнения: $I = 140$ А и $v = 4-4,5$ мм/с.

Именно в этой зоне обеспечивается:

- максимальная глубина упрочнённого слоя (1,2-1,25 мм);
- образование мелкодисперсного мартенсита;
- высокое сочетание твёрдости (до 2100 HV₃₀) и трещиностойкости;
- минимальная потеря массы в эксплуатации.

Проведённые эксперименты позволили установить отдельные закономерности влияния скорости перемещения плазматрона и силы тока дуги на глубину закалки и твёрдость поверхности. Однако полученные зависимости носят нелинейный характер и формируются под влиянием совокупности технологических параметров. В связи с этим для комплексной оценки межфакторных взаимодействий и определения оптимального режима плазменной закалки был применён метод регрессионного анализа.

Регрессионный анализ в оптимизации режимов плазменной обработки

С учётом сложности межфакторных взаимодействий и нелинейной природы зависимостей между режимами и результатами обработки, традиционные методы подбора параметров (эмпирические, табличные) оказываются недостаточно точными и трудоёмкими.

Именно в этом контексте регрессионный анализ выступает как универсальный и мощный инструмент, позволяющий формализовать и

количественно описать зависимости между входными и выходными параметрами плазменной обработки. Применение регрессионного моделирования обеспечивает построение аналитических уравнений, описывающих влияние факторов на целевые выходные параметры, и даёт возможность проводить многокритериальную оптимизацию режимов обработки.

Общая формула (13) модели линейной регрессии:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (13)$$

где Y – выходные параметры (например, твёрдость поверхности);

X_1 – входные параметры (сила тока, скорость перемещения, напряжение и др.);

β_1 – коэффициенты регрессии, отражающие вклад каждого фактора;

ε – случайная ошибка модели.

Формула (14) полиномиальных регрессий второго порядка, включающие квадратичные и перекрёстные члены:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (14)$$

Оценка коэффициентов производится методом наименьших квадратов, обеспечивая минимальную сумму квадратов отклонений между фактическими и расчётными значениями отклика. После построения модели проводится её статистическая проверка (коэффициенты значимости, коэффициент детерминации R^2 , анализ остатков и др.) [120].

Целью исследования являлось построение регрессионных моделей откликов от параметров процесса и выбор оптимального режима, обеспечивающего максимальное качество обработки при минимальных деформациях.

Для проведения регрессионного анализа был выбран план эксперимента полного факторного дизайна с использованием центрально-композитного плана (ЦКП). Были варьированы четыре параметра на десяти уровнях (нижний, средний, верхний), включающие следующие параметры: X_1 – сила тока, А (100–180); X_2 – скорость перемещения горелки, мм/с (2–6); X_3 – напряжение дуги, В (40–70); X_4 – расстояние от горелки до поверхности, мм (3–8).

Выходные параметры (отклики) процесса: Y_1 – твёрдость поверхности, HRC; Y_2 – глубина закалки, мм; Y_3 – относительная абразивная износостойкость; Y_4 – относительная ударная вязкость, Дж/см². Каждый отклик регистрировался по завершении обработки с использованием стандартных методов контроля. В таблице 14 представлены входные параметры плазменной закалки.

За выходные параметры (отклики) процесса были взяты следующие показатели:

- твердость – по шкале HRC;

- глубина закаленного слоя – определением микротвердости по поперечному сечению закаленного образца от поверхности к центру до получения стабильных результатов микротвердости;

– абразивная износостойкость – эксплуатационные испытания по потере контролируемых параметров и массе деталей при абразивном изнашивании. Коэффициент относительной абразивной износостойкости определяется по изменению контролируемых размеров (толщина, ширина, длина режущей кромки и т.д.);

– относительная ударная вязкость – методом испытания на ударный изгиб.

Таблица 14 – Межфакторные варьируемые входные параметры плазменной закалки

№ опыта	X ₁ : Ток, А	X ₂ : Скорость перемещения горелки, мм/с	X ₃ : Напряжение, В	X ₄ : Расстояние от горелки до поверхности, мм
1	100	5	40	4
2	160	4	35	6
3	180	5	70	8
4	120	4	41	8
5	155	4	70	4
6	130	3	60	5
7	170	5	50	3
8	140	4	55	6
9	150	3	60	5
10	190	3	45	7

Для расчёта моделей использовался множественный регрессионный анализ с помощью программных средств Excel, Statistica и Python (библиотеки statsmodels, sklearn).

Для каждого отклика была получена модель второго порядка. Пример модели для твердости поверхности:

Модель Y₁ (твердость поверхности):

$$Y_1 = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{14}X_1X_4 + \dots + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{44}X_4^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{14}X_1X_4 + b_{23}X_2X_3 + b_{24}X_2X_4 + b_{34}X_3X_4$$

На основании данных 10 экспериментов (таблица 11) были определены коэффициенты:

$$Y_1 = 60,9 + 0,041X_1 + 0,82X_2 + 0,026X_3 + 0,11X_4 + 0,00012X_1X_3 + 0,00021X_1X_4 + 0,0041X_2X_4 + 0,00014X_1^2 - 0,082X_2^2 - 0,00031X_3^2 - 0,011X_4^2$$

Аналогично были получены модели Y₂, Y₃, Y₄.

Модель Y₂ (глубина закалки):

$$Y_2 = 1.2 + 0.0031X_1 + 0.018X_2 + 0.0014X_3 + 0.012X_4 + 0,000001X_1X_3 + 0,00018X_2X_4 - 0,000012X_1^2 - 0,0021X_2^2 - 0,000008X_3^2$$

Модель Y_3 (относительная абразивная износостойкость):

$$Y_3 = 1.33 + 0,0018X_1 + 0.011X_2 + 0.0009X_3 + 0.006X_4 + 0.000004X_1X_3 + 0,000071X_2X_4 - 0.000006X_1^2 - 0,00091X_2^2$$

Модель Y_4 (относительная ударная вязкость):

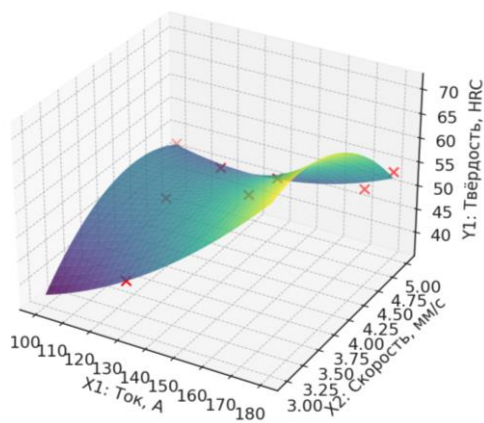
$$Y_4 = 1,13 + 0.0011X_1 + 0,009X_2 + 0.0007X_3 + 0,04X_4 + 0,000003X_1X_4 + 0,000051X_2X_4 - 0,000004X_1^2 - 0,00062X_2^2$$

Отрицательные коэффициенты в уравнениях регрессии обусловлены характером влияния технологических факторов на исследуемый выходной параметр. В регрессионном анализе знак коэффициента определяет направление воздействия соответствующего фактора на отклик системы. Положительный знак коэффициента свидетельствует о прямом влиянии фактора, при котором увеличение значения входного параметра приводит к росту выходного показателя. Отрицательный знак коэффициента указывает на обратный характер влияния, при котором увеличение значения фактора сопровождается снижением исследуемого выходного параметра. Наличие отрицательных коэффициентов в математической модели отражает физические особенности процесса плазменной закалки, связанные с возможным перегревом поверхности, изменением теплового баланса, ростом зерна и снижением эффективности упрочнения при превышении оптимальных режимов обработки.

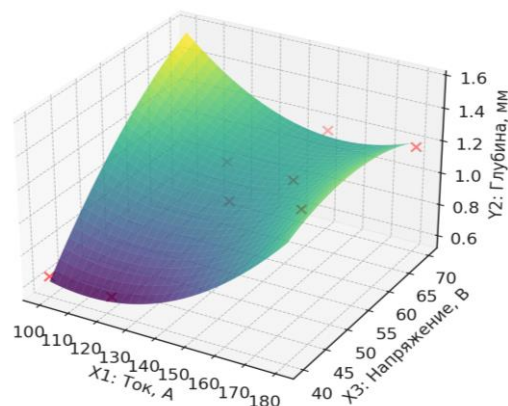
Достоверность моделей проверялась через коэффициент детерминации R^2 (все модели имели $R^2 > 0.92$), а также через критерий Фишера. Результаты выходных параметров представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Результаты выходных параметров межфакторных взаимодействий варьируемых входных параметров режима плазменной закалки

№ опыта	Y_1 : Твёрдость, HRC	Y_2 : Глубина, мм	Y_3 : Коэффициент относительной абразивной износостойкости, ед.	Y_4 : Относительная ударная вязкость, Дж/см ²
1	57.2	1,34	1,42	1,05
2	59.0	1.00	1,60	1,18
3	65.5	1.18	1,50	1,01
4	59.4	1.60	1,48	1,20
5	55.0	1.18	1,52	1,08
6	65,5	1,32	1,31	1,19
7	68,3	1,18	1,46	1,29
8	60.0	1.22	1,30	1,27
9	51,8	1,12	1,62	0,98
10	68,0	0,9	1,47	1,07



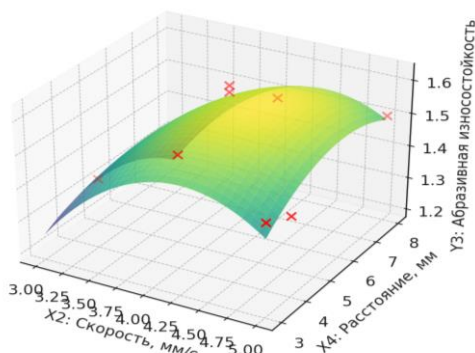
а



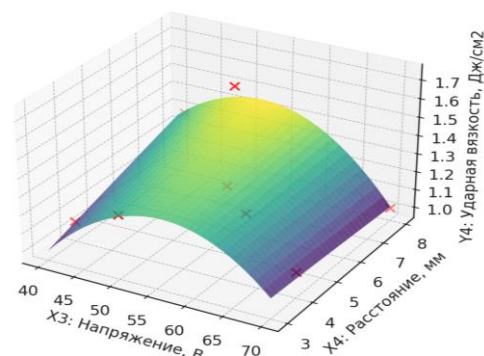
б

а – аппроксимация твёрдости от тока и скорости перемещения; б – аппроксимация глубины заковки от тока и напряжения дуги

Рисунок 29 – 3D-графики выходных параметров, лист 1



в



г

в – аппроксимация абразивной износостойкости от скорости и расстояния; г – аппроксимация ударной вязкости от напряжения дуги и расстояния

Рисунок 29, лист 2

В соответствии с рисунком 29, для визуализации влияния технологических параметров плазменной заковки стали 65Г на ключевые показатели качества поверхности, построены 3D-графики откликов.

Представленные графики наглядно демонстрируют нелинейный характер зависимости выходных параметров от управляющих факторов, что подтверждает эффективность применения регрессионного анализа для оптимизации режимов плазменной обработки.

На графике твёрдости отчётливо выражен максимум при средней скорости и повышенном токе, в то время как график абразивной износостойкости демонстрирует устойчивый минимум при высоких скоростях и пониженной энергонагрузке. Наблюдается увеличение глубины заковки с ростом тока и напряжения. Показатель ударной вязкости максимально коррелирует с

твёрдостью и глубиной, достигая пика при согласованных значениях X_1 и X_3 , что подчёркивает важность комплексной оптимизации режима.

Оптимальные параметры были найдены методом целевой функции по следующей формуле (15):

$$F = w_1 Y_1 + w_2 Y_2 + w_3 Y_3 + w_4 Y_4 \quad (15)$$

где F – интегральная целевая функция;

w_1, w_2, w_3 и w_4 – весовые коэффициенты, отражающие относительную значимость каждого отклика.

При одинаковой приоритетности твёрдости и износостойкости, умеренном значении глубины и обязательной минимизации абразивной износостойкости были заданы веса: $w_1=0.3, w_2=0.2, w_3=0.2, w_4=0.3$.

Оптимальные параметры составили: $X_1=140$ А; $X_2=4$ мм/с; $X_3=55$ В; $X_4=6$ мм. Ожидаемые выходные показатели при этих параметрах составили: $Y_1=60$ HRC; $Y_2=1.22$ мм; $Y_3=1.3$; $Y_4=1.27$.

Проведённый регрессионный анализ откликов Y_1 – Y_4 при плазменной закалке стали 65Г выявил выраженную нелинейную зависимость твёрдости, глубины закалки, коробления и износостойкости от основных технологических параметров. Увеличение силы тока (X_1) положительно влияет на твёрдость (Y_1), глубину закалки (Y_2) и износостойкость (Y_4), но одновременно усиливает коробление (Y_3), особенно при увеличенном расстоянии до поверхности (X_4). Скорость перемещения горелки (X_2) снижает глубину и износостойкость, но эффективно уменьшает коробление и вносит умеренное отрицательное влияние на твёрдость. Максимальные значения твёрдости ($Y_1 \approx 60$ HRC) и глубины закалки ($Y_2 \approx 1.22$) достигаются при $X_1 \approx 140$ А, $X_2 \approx 4$ мм/с, $X_3 \approx 55$ В и $X_4 \approx 6$ мм. Использование регрессионных моделей с визуализацией в виде 3D-графиков откликов позволило определить область оптимального технологического режима, обеспечивающего улучшение всего комплекса свойств поверхности при минимальных деформациях.

Таким образом, оптимальный режим составил следующие показатели: сила тока – 140 А; скорость перемещения горелки – 4 мм/с, напряжение дуги – 55 В; расстояние от горелки до поверхности – 6 мм. Твёрдость была определена как наиболее значимый отклик по результатам регрессионного анализа. Применение методов регрессионного анализа в сочетании с 3D-визуализацией позволило определить область оптимальных параметров плазменной обработки стали 65Г, обеспечивающих оптимальное сочетание прочностных и эксплуатационных характеристик поверхности с минимальными деформациями. Полученные результаты имеют высокую практическую значимость для выбора режимов плазменной закалки тяжело нагруженных деталей сельскохозяйственной техники.

3.3 Исследование распределения остаточных напряжений в поверхностном слое стали 65Г после плазменной закалки

Одним из важнейших факторов, определяющих эксплуатационную надёжность тяжело-нагруженных рабочих органов почвообрабатывающих машин, являются остаточные напряжения, формирующиеся в поверхностном слое материала в результате интенсивных термических воздействий. При плазменной закалке локальный нагрев и последующее высокоскоростное охлаждение приводят к возникновению значительных температурных градиентов и фазовых превращений, что обуславливает формирование сложного напряжённо-деформированного состояния. В результате плазменной закалки в поверхностном слое стали формируется закалённая мартенситная структура, сопровождающаяся увеличением удельного объёма и высокой плотностью дефектов кристаллической решётки. Эти структурные изменения, совместно с термоупругими деформациями, приводят к возникновению остаточных напряжений с выраженной градиентной зависимостью по глубине [121].

Ввиду больших трудностей подсчета напряжений в деталях и изделиях принята методика оценки величины и характера распределения остаточных напряжений механическим (разрушающим) методом. Этот метод основан на том, что удаление части детали с остаточными напряжениями эквивалентно приложению на вновь появившихся поверхностях, напряжений обратного знака, равных по абсолютной величине остаточным напряжениям.

Исследование распределения остаточных напряжений проводилось на образцах из стали 65Г после поверхностной плазменной закалки, выполненной на установке УДГЗ-200. Обработка осуществлялась в оптимальном режиме: сила тока дуги – 140 А, напряжение дуги – 55 В, скорость перемещения плазменной горелки – 4 мм/с, расстояние от горелки до поверхности – 6 мм. Указанные параметры обеспечивали устойчивое горение дуги и равномерное формирование упрочнённого слоя без оплавления поверхности.

Оценку величины и характера распределения внутренних остаточных напряжений в плазменно-закаленной детали выполняли механическим методом. Распределение остаточных напряжений оценивалось по величине упругих деформаций. Заметим, что такая оценка не является строгой, поскольку основана на ряде допущений и упрощений. В частности, исходя из литературных источников, принято, что максимальное значение остаточных напряжений составляет 0,25...0,30% от величины полных внутренних напряжений. Для оценки остаточных напряжений необходимо выдержать определенное время от термообработки до разрезки в течение которого остаточные напряжения (сжимающие и растягивающие) взаимно уравниваются внутри тела без участия внешних нагрузок. Остаточное напряжение в спиленном слое можно оценить по расчету величины силы, вызвавшей упругую деформацию, хотя такой способ применяется, в основном, для тонких прокатанных полос. Тем не менее, значение приведенной методики заключается прежде всего в качественной и полуколичественной оценке распределения внутренних остаточных напряжений в поверхностной зоне плазменно-закаленной стали. Для оценки остаточных напряжений необходимо выдержать время от

термообработки до разрезки в течение 3-5 суток, иначе измеряется не остаточные, а полные внутренние напряжения. В течении этого времени остаточные напряжения (сжимающие и растягивающие) взаимно уравниваются внутри тела без участия внешних нагрузок.

Для измерения упругих деформаций плазменно-закаленного лемеха плуга путем огневой резки вырезали сегмент длиной 145 мм и шириной 13 мм. Из вырезанного сегмента (исключая зону термического влияния) был приготовлен опытный образец (5x60x120) с использованием отрезного станка Secotom-60 (Struers).

Торцы образца подгоняли точно под 90 градусов к краям, далее вдоль образца проводили осевую линию, по которой измеряли длину образца в течение всего эксперимента. Приготовленный таким образом образец спиливали с обеих краев по 1 мм симметрично с двух сторон. До и после спиливания длину образца тщательно измеряли с точностью 0,05 мм. принятой для нониуса штангенциркуля, ширину образца замеряли микрометром.

Знак внутренних напряжений определяли по изменению длины образца. Если длина образца увеличилась, значит удалены слои металла, в которых действовали внутренние растягивающие напряжения. Уменьшение длины образца является показателем того, что спилены слои металла, в которых действовали внутренние сжимающие напряжения. Методика реализована в рамках технического решения, описанного в патенте на полезную модель №8917 (Приложение Б) [122].

Анализ распределения остаточных напряжений показал, что в поверхностном слое стали 65Г формируются сжимающие остаточные напряжения, максимальные значения которых фиксируются непосредственно у поверхности. В приповерхностной зоне (на глубине до 0,05–0,10 мм) величина сжимающих напряжений достигает 353–440 МПа, на глубине 0,10–0,3 величина сжимающих напряжений составляет –180...–220 МПа.

Формирование сжимающих остаточных напряжений значительной величины в поверхностном слое оказывает благоприятное влияние на эксплуатационные свойства материала. Наличие напряжений сжатия порядка 300–400 МПа эффективно препятствует зарождению и распространению поверхностных трещин, снижает чувствительность материала к ударным нагрузкам и повышает сопротивление статическому и ударному изгибу. Это подтверждается результатами испытаний на трещиностойкость, приведёнными в подразделе 4.5.

Таким образом, плазменная закалка стали 65Г в оптимальном режиме на установке УДГЗ-200 обеспечивает формирование выраженного градиентного распределения остаточных напряжений с преобладанием сжимающих напряжений в поверхностном слое, что является одним из ключевых факторов повышения долговечности лемехов плугов и лап культиваторов при работе в условиях абразивного износа и динамических нагрузок.

3.4 Разработка рекомендаций по технологической инструкции плазменной закалки лемехов плугов

Технологическая инструкция плазменной закалки лемеха плуга (Приложение В) предназначена для систематизации и регламентации всех этапов процесса локального термического упрочнения, обеспечивая воспроизводимость заданных структурно-механических свойств поверхности. Инструкция обеспечивает стандартизацию технологического процесса на основе физических и химических свойств материала, конструктивных особенностей оборудования и требований к эксплуатационным характеристикам рабочих органов почвообрабатывающей техники, что повышает надежность, износостойкость и ресурс лемехов плугов при интенсивной эксплуатации.

Термическое упрочнение лемеха осуществляется установкой плазменной закалки УДГЗ-200. В установке используется «дуга прямого действия», когда дуга горит между электродом и изделием. Установка обеспечивает безконтактный поджог дуги с плавным нарастанием и регулированием тока закалки. Плазматрон рассчитан на силу тока 100-200 А, Номинальное рабочее напряжение 40-100 В, потребляемая мощность не более 25 кВт. Плазматрон оснащен блоком охлаждения закалочной горелки с расходом охлаждающей жидкости при давлении 3,2 кг/см² до 7 л/мин. В установке в качестве охлаждающей жидкости используется Cooltec20, увеличивающая срок службы плазматрона за счет уменьшения количества отложений накипи на внутренней поверхности системы охлаждения. Установка оснащена газовым редуктором АР-40. В качестве плазмообразующего газа используется аргон.

Рекомендации к технологической инструкции плазменной закалки лемехов плугов:

1. Подготовка поверхности.

1.1 Зачистка поверхности абразивным кругом (рекомендуется $R_z \leq 16$) от загрязнений, ржавчины и удаление окалины, протирка ветошью и обезжиривание ацетоном. Степень чистоты — не ниже St2 (по ISO 8501-1).

1.2 Обеспечить шероховатость $R_a \leq 2,5$ мкм.

1.3 Проверка на деформации и трещины. Поверхность должна быть ровной, без остаточных напряжений.

2. Выбор оптимальных режимов плазменной закалки (УДГЗ-200)

На основании регрессионного анализа в данной диссертационной работе (пункт 2.2) были выбраны оптимальные режимы плазменной закалки лемехов плуга и лап культиваторов (таблица 16).

Таблица 16 – Оптимальные параметры плазменной закалки

Обрабатываемая деталь	Сила тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость перемещения, мм/с	Расстояние от сопла до поверхности, мм	Ширина зоны закалки, мм
Сталь 65Г	130-140	50–55	4-4,5	6–7	15-18

3. Подготовка оборудования для работы

3.1 Перед размещением необходимо убедиться в работоспособности установки плазменной закалки УДГЗ-200 согласно техническим требованиям и ее заземления.

3.2 Присоединение баллона с аргоном; в блок охлаждения горелки заливается охлаждающая жидкость Cooltec20.

3.3 Присоединение закаливаемой детали к установке УДГЗ-200 с обратной полярностью.

4. Ведение закалки плужного лемеха

На рисунке 30 представлен эскиз лемеха плуга

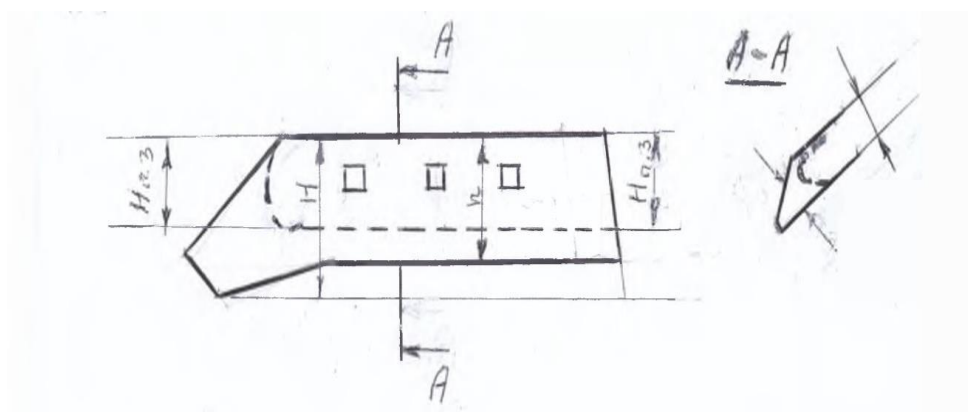


Рисунок 30 – Эскиз лемеха плуга

4.1 Критериями предельного состояния лемехов является износ носка на величину более 75 мм, износ лезвия по ширине более 90 мм. Положение угла наклона (заточки) лезвийной части – $\beta=30^\circ$.

4.2 Скоростью перемещения плазменной дуги поддерживается запотевание поверхности, но не допускается микроплавление, что требует высокой квалификации термиста.

4.3 Наложение дорожек с шагом 7-18 мм, перекрываются срединные, наиболее темные, части дорожек.

4.3.1 Лемех плуга закаливать вдоль режущей кромки на ширину 12-15 мм. Двигаться от центра к бокам для снижения остаточного напряжения. Длина прохода – 300-500 мм (в зависимости от модели).

4.3.2 Лапы культиваторов закаливать по всей нижней режущей кромке (в форме клина). Ширина зоны: 15-18 мм. Возможно наложение 2 проходов с перекрытием 30%.

4.4 Охлаждение в жидкости. Охлаждение, необходимое для закалки, обеспечивается за счет отвода тепла во внутренние слои изделия, что существенно упрощает технологический процесс термической обработки.

5. Контроль качества

5.1 Поверхность в результате правильной закалки окрашивается в цвета «побежалости» с преобладанием черно-серые и темно-синие тона

5.2 Наличие красновато-коричневых оттенков на поверхности указывает на плохую аргоновую защиту места закалки вследствие недостатка аргона в баллоне, смещения электрода в плазмообразующем сопле, длинной дуги.

Причиной может быть загрязненность поверхности [123].

5.3 Неравномерная по ширине дорожка с бело-синим налетом показывает «непрокалку» вследствие высокого тока или высокой скорости перемещения плазмотрона.

5.4 На поверхности низколегированных сталей марок 65Г, 40 ХГС твердость после плазменной закалки должна составлять 50-65HRC. Для выполнения замеров твердости рекомендуется использовать прибор УЗИТ-3.

5.5 Толщина закалки (упрочненного слоя) 0,7-2 мм, выявляется на образцах или на нерабочих краях лемеха травлением в спиртовом 20% растворе азотной кислоты (HNO_3).

5.6 Не допускается появление трещин. Закаленные поверхности зачищаются абразивным кругом.

6. Техника безопасности

6.1 При работе с установкой плазменной закалки УДГЗ-200 необходимо соблюдать «Правила безопасной эксплуатации электроустановок» согласно ГОСТ 12.3.003.86.

6.2 Использовать средства индивидуальной защиты: маску сварщика, перчатки, костюм с термозащитой.

Проведённая разработка рекомендаций к технологическому регламенту плазменной закалки лемехов плугов и лап культиваторов позволила комплексно систематизировать ключевые этапы технологического процесса с учётом конструктивных особенностей оборудования УДГЗ-200, физико-химических свойств материала (сталь 65Г) и требований к эксплуатационным характеристикам рабочих органов почвообрабатывающей техники.

Использование установки плазменной закалки УДГЗ-200 с прямодействующей дугой обеспечивает эффективную реализацию процессов локального термического упрочнения, характеризующегося высокой степенью управляемости тепловложением, локализацией зоны воздействия и минимизацией деформаций обрабатываемых элементов. Установка оснащена современной системой охлаждения, использующей теплоноситель Cooltec20, что позволяет значительно повысить надёжность и ресурс плазмотрона при длительной эксплуатации. Работа с аргоновой средой как плазмообразующим газом гарантирует минимизацию окисления и повышение стабильности дуги [124, 125].

Оптимальные параметры закалки, выявленные на основе регрессионного анализа, позволяют достичь равномерного формирования закалённого слоя толщиной от 0,7 до 1,5 мм при обеспечении целевого диапазона твёрдости поверхности 50–65 HRC. Диапазон значений тока, напряжения, скорости перемещения и межэлектродного расстояния подобран с учётом обеспечения температурных условий аустенитизации при сохранении стабильности теплового фронта и предотвращения перегрева.

Таким образом, рассмотренные технологические аспекты плазменной закалки обеспечивает повышение надёжности, износостойкости и ресурса лемехов плугов и лап культиваторов. Его внедрение гарантирует стабильность технологического процесса, воспроизводимость получаемых структурно-

механических характеристик и соответствие продукции требованиям современного сельскохозяйственного производства к качеству обработки почвы.

3.5 Разработка нормативно-технической документации

Разработка нормативно-технической документации является актуальной и одной из ключевых задач настоящей исследовательской работы, регламентирующей процесс плазменной закалки тяжело нагруженных деталей сельскохозяйственных машин. В рамках настоящей работы научно обоснован выбор оптимальных технологических режимов плазменной закалки тяжело нагруженных деталей почвообрабатывающих машин, также исследовались показатели износостойкости, твердости, трещиностойкости, коррозионной стойкости и эксплуатационной долговечности рабочих органов почвообрабатывающей техники. Реализация разработанных технологических решений позволяет обеспечить формирование упрочнённого слоя с заданными структурно-механическими характеристиками и стабильными показателями качества. По итогам выполненных исследований был разработан стандарт организации СТО ТОО 190740006823-01-2026 «Плазменная закалка изделий из углеродистых конструкционных сталей» (Приложение Г).

Настоящий стандарт организации устанавливает требования к технологическому процессу плазменной закалки изделий из углеродистых конструкционных сталей, применяемых в машиностроении и сельскохозяйственном производстве.

Стандарт распространяется на быстроизнашивающиеся рабочие органы сельскохозяйственной техники (лемехи плугов, лапы культиваторов, долота, ножи и другие элементы почвообрабатывающих машин), эксплуатируемые в условиях интенсивного абразивного и ударного нагружения.

В документе установлены термины и определения, требования к материалам и оборудованию, технологический процесс, контроль качества, требования к качеству, условиям безопасности и охраны окружающей среды, документация и гарантийные обязательства.

Технологическая карта плазменной закалки включает следующие основные этапы: приёмку и подготовку изделия, очистку поверхности, разметку и закрепление детали, настройку плазменной установки, проведение процесса плазменной закалки, последующее охлаждение после обработки, контроль твердости, глубины упрочнённого слоя и наличие скрытых дефектов, а также возможный отпуск при необходимости.

Технологический процесс плазменной закалки включает последовательность операций, направленных на подготовку поверхности детали, проведение упрочняющей обработки и обеспечение требуемых эксплуатационных характеристик материала. Качество выполнения подготовительных операций оказывает существенное влияние на эффективность плазменной закалки, равномерность нагрева и формирование упрочнённого слоя.

На первом этапе технологического процесса выполняется подготовка поверхности детали. Она включает зачистку поверхности абразивным кругом от

загрязнений, ржавчины и окалины с достижением рекомендуемой шероховатости поверхности не более $Rz \leq 16$. После механической очистки поверхность протирают ветошью и обезжиривают ацетоном для удаления остатков пыли, масел и других загрязнений. Степень чистоты поверхности должна соответствовать уровню не ниже St2 в соответствии с требованиями ISO 8501-1. При этом необходимо обеспечить шероховатость поверхности $Ra \leq 2,5$ мкм, что способствует стабильности процесса нагрева и равномерному формированию упрочнённого слоя.

Таблица 17 – Рекомендуемые режимы закалки для различных марок стали

Марка стали	Режим закалки	Температура нагрева, °C	Мощность плазменной дуги, кВт	Скорость перемещения плазмотрона, мм/с	Глубина закалённого слоя, мм	Твёрдость, HRC	Время нагрева, с
40	Средний	880-1020	40-50	6-12	0,7-2,0	48-55	4-12
45	Средний	900-1050	45-55	6-10	0,8-2,5	50-58	5-15
50	Средний-интенсивный	900-1050	40-55	5-9	1,0-3,0	52-60	6-18
65Г	Интенсивный	950-1050	40-60	3-8	1,0-2,2	54-60	3-12

В соответствии с таблицей 17, после завершения подготовительных операций осуществляется выбор технологических параметров плазменной закалки, которые определяются маркой обрабатываемой стали, требуемой глубиной упрочнённого слоя и необходимыми значениями твёрдости поверхности.

Для стали 65Г температура нагрева рекомендуется выше 950 °C для обеспечения полного аустенитного состояния перед плазменной закалкой. После закалки рекомендуется проводить контроль твёрдости и металлографический анализ поверхностного слоя для подтверждения соответствия требованиям стандарта.

После плазменной закалки изделия охлаждаются самозакаливанием, естественным воздушным охлаждением или распылением воды. При этом резкое водяное охлаждение деталей не допускается во избежание образования трещин и коробления. Выбор способа охлаждения определяется толщиной и массой детали, а также режимом плазменной обработки. Рекомендуемые способы охлаждения деталей в зависимости от указанных параметров приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Рекомендуемые способы охлаждения деталей в зависимости от толщины, массы и режима плазменной обработки

Толщина детали, мм	Масса детали, кг	Режим плазменной обработки	Рекомендуемый способ охлаждения	Время охлаждения до 200-250 °С	Примечания / контроль
6–10	до 2	Лёгкий режим, низкая мощность	Естественное воздушное охлаждение	2–3 мин	Подходит для мелких деталей; контролировать визуально
6–10	до 2	Интенсивный режим, высокая мощность	Принудительное воздушное охлаждение	1–2 мин	Обеспечивает формирование мартенсита без перегрева
10–20	2–10	Средний режим	Принудительное воздушное охлаждение или локальное водовоздушное	3–5 мин	Контроль температуры термомпарами или пирометром
10–20	2–10	Интенсивный режим	Локальное водовоздушное охлаждение	2–4 мин	Равномерное охлаждение; снижает риск перегрева и деформации
20–30	10–30	Средний режим	Локальное водовоздушное или комбинированное (воздух + вода)	4–6 мин	Контроль температуры и скорости охлаждения, избегать термических напряжений
>30	>30	Интенсивный режим	Комбинированное водовоздушное охлаждение с регулировкой подачи	5–8 мин	Обязателен контроль термомпарами по поверхности и внутри детали; контроль деформации

Представленные рекомендации позволяют обеспечить формирование требуемой структуры металла и предотвратить возникновение термических дефектов в процессе охлаждения.

Качество изделий после плазменной заковки должно соответствовать установленным требованиям к микроструктуре, твёрдости и отсутствию дефектов. Соблюдение данных требований обеспечивает повышение износостойкости деталей и их надёжную эксплуатацию в рабочих условиях. Микроструктура изделий должна представлять собой мелкозёрнистый мартенсит. Контроль микроструктуры проводится в соответствии с требованиями ГОСТ 5639-82. Твёрдость контролируется по методам, установленным стандартами ГОСТ 9013-59 и ГОСТ 2999-75. На поверхности изделий не допускаются трещины, оплавления, прожоги, а также коробление, превышающее 0,5% длины изделия. Для сельскохозяйственных деталей допускается неравномерность твёрдости в пределах ± 3 HRC.

Входной контроль материала осуществляется путём проверки сертификатов и химического состава по ГОСТ 7565. Операционный контроль включает контроль тока, скорости обработки и температуры дуги. Приёмочный

контроль включает 100% визуальный осмотр изделий, измерение твёрдости не менее чем в пяти точках на каждом лемехе, а также выборочный металлографический анализ одной детали из партии до 50 штук.

Стандартизация процесса плазменной закалки изделий из углеродистых конструкционных сталей способствует повышению стабильности технологического процесса, обеспечению воспроизводимости структурно-механических характеристик упрочнённого слоя и улучшению эксплуатационных показателей деталей, работающих в условиях интенсивных механических и абразивных нагрузок.

Таким образом, разработка стандарта организации является необходимым условием обеспечения стабильности технологического процесса, повышения качества продукции и соответствия современным требованиям промышленного производства к эксплуатационным характеристикам тяжело нагруженных деталей.

Выводы к разделу:

1. Изучены особенности поверхностной плазменной обработки тяжелонагруженных элементов почвообрабатывающих машин. При точном подборе режимов плазменной закалки деталей малой толщины удаётся минимизировать риски коробления, перегрева и микротрещинообразования. В отличие от наплавки и других методов упрочнения, плазменная закалка обеспечивает комплексное улучшение эксплуатационных характеристик при высокой технологической и экономической эффективности.

2. Проведен анализ параметров установки УДГЗ-200 и выбор оптимальных режимов методом регрессионного анализа по межфакторным варьируемым входным параметрам плазменной закалки. Оптимальный режим составил следующие показатели: сила тока – 140 А; скорость перемещения горелки – 4 мм/с, напряжение дуги – 55 В; расстояние от горелки до поверхности – 6 мм. За выходные параметры плазменной закалки были взяты показатели твердости, глубины закаленного слоя, абразивной износостойкости и относительная ударная вязкость. Твёрдость была определена как наиболее значимый отклик по результатам регрессионного анализа. Анализ в сочетании с 3D-визуализацией позволило определить область оптимальных параметров плазменной обработки стали 65Г.

3. Исследованы закономерности формирования и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое стали 65Г после плазменной закалки. В результате исследований установлено, что при плазменной закалке формируется градиентное распределение остаточных напряжений с преобладанием сжимающих напряжений в приповерхностной зоне 353–440 МПа и снижаются до 180–220 МПа на глубине 0,10–0,30 мм. Формирование такого состояния способствует повышению трещиностойкости, износостойкости и эксплуатационной долговечности лемехов плугов и лап культиваторов.

4. Разработана технологическая инструкция по плазменной закалке лемехов плугов, которая включает следующие пункты: подготовка поверхности лемехов плуга, выбор оптимальных режимов плазменной закалки, подготовка

оборудования для работы, ведение закалки плужного лемеха, контроль качества, техника безопасности, охрана окружающей среды и метрологическое обеспечение процессов закалки и качества продукции.

5. Разработан стандарт организации СТО ТОО 190740006823-01-2026, регламентирующий процесс плазменной закалки изделий из углеродистых конструкционных сталей, применяемых в сельскохозяйственном машиностроении. Стандарт устанавливает требования к технологическому процессу, режимам закалки, контролю качества и эксплуатационным характеристикам быстроизнашивающихся деталей. Реализация документа обеспечивает формирование упрочнённого слоя с заданными структурно-механическими свойствами и повышает надёжность рабочих органов почвообрабатывающей техники.

Для подтверждения эффективности предложенных технологических решений были проведены комплексные экспериментальные исследования, включающие анализ структуры, фазового состава и физико-механических свойств упрочнённых деталей.

4 ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА СТАЛИ 65 Г

4.1 Оценка глубины упрочнённого слоя после плазменной закалки

Определение глубины закалённого слоя проводилось по методу измерения микротвёрдости на поперечном шлифе закалённого образца. Метод основан на изменении микротвёрдости в зависимости от расстояния от поверхности (рисунок 31), что позволяет количественно оценить степень и глубину плазменного упрочнения. Измерения проводились от поверхности вглубь образца до достижения стабильных значений микротвёрдости (таблица 19).



Рисунок 31 – Расположение отпечатков микротвёрдости

Таблица 19 – Результаты измерения микротвёрдости $HV_{0,01}$ по глубине

Шаг, мм	$HV_{0,01}$	Шаг, мм	$HV_{0,01}$
0	774,6	1,12	713,9
0,02	803,6	1,14	749,5
0,04	782,4	1,16	724,9
0,1	802,7	1,18	683,3
0,2	817,4	1,2	728,7
0,3	767	1,22	723,8
0,5	746,3	1,24	724,9
0,6	759,8	1,26	719,1
0,7	765	1,28	730,7
0,8	669,5	1,3	701,3
0,9	756,3	1,32	706,2
1	741,4	1,34	681,3

По данным таблицы 19 можно установить, что максимальные значения микротвёрдости по шкале Виккерса ($HV_{0,01}$) зафиксированы в приповерхностной зоне на глубине 0,02-0,2 мм и составляют 803,6-817,4 $HV_{0,01}$. По мере увеличения глубины наблюдается постепенное снижение твёрдости, и в диапазоне 0,5-1,0 мм значения находятся преимущественно на уровне ~741-765 $HV_{0,01}$, с локальным снижением до 669,5 $HV_{0,01}$ на глубине 0,8 мм. Стабилизация микротвёрдости происходит на глубине около 1,2-1,24 мм, где значения удерживаются в

интервале $\sim 719-730$ HV_{0,01}. Для повышения точности определение глубины закаленного слоя проводилось по усреднённым данным не менее трёх параллельных измерительных линий на разных участках шлифа. Отклонение результатов не превышало $\pm 3\%$, что соответствует допустимой погрешности измерений, установленной ГОСТ 8.051.

Таким образом, глубина закаленного слоя, определённая по критерию стабилизации микротвёрдости, составляла в среднем $1,22 \pm 0,05$ мм, что свидетельствует о высокой эффективности режима плазменной закалки при выбранных параметрах.

4.2 Изменение твердости поверхностного слоя стали в результате обработки

Изменение свойств поверхностного слоя металлов в результате различных видов термической и плазменной обработки является одним из ключевых направлений в современных материаловедческих исследованиях [126, 127]. Особенно важна оценка влияния плазменной закалки на твердость и структуру поверхностного слоя стали, поскольку эти параметры определяют эксплуатационные характеристики изделий, такие как износостойкость и прочность [128]. В настоящей работе проведено исследование изменения твердости стали 65Г до и после плазменной обработки. Для этого использовались измерения твердости методом Виккерса (HV₃₀) на исходных и обработанных участках образцов. Целью исследования было количественное определение влияния плазменной закалки на механические свойства поверхности стали 65Г, а также выявление основных факторов, влияющих на наблюдаемое повышение твердости.

В таблице 20 представлены результаты измерений твердости до и после плазменной обработки образцов стали 65 Г. Для каждого образца были проведены параллельные испытания: на исходном участке (без обработки) и на участке, подвергнутом плазменной закалке.

Представленные данные в таблице 20 свидетельствуют о значимом изменении и повышении твердости образцов стали 65Г за счёт плазменной закалки. На основании 3-х измерений по каждому образцу было взято среднее значение измерений твердости до и после закалки. В среднем по всем сериям измерений рост твёрдости составил около 3,5 раза, что свидетельствует о высокой эффективности плазменной закалки [129, 130].

Рост твёрдости стали 65Г после плазменной обработки объясняется рядом факторов:

- формированием мелкодисперсной мартенситной структуры в поверхностном слое;
- увеличением плотности дефектов кристаллической решётки, которые препятствуют пластической деформации;
- локальной закалкой поверхностных участков при сохранении вязкой сердцевины материала, что также повышает износостойкость.

Неоднородность прироста твёрдости по образцам может быть обусловлена различиями в тепловом режиме обработки, скоростью охлаждения, а также

микроструктурными особенностями исходного металла. Полученные данные подтверждают перспективность применения плазменной закалки для улучшения эксплуатационных характеристик стали 65Г [131].

Таблица 20 – Результаты измерений твёрдости на поверхности образцов стали 65 Г

№ образца	Наличие плазменной обработки на участке замера	HV ₃₀			Среднее значение HV ₃₀
		1	2	3	
1	Без обработки	484,7	422,7	653,6	520,3
	С обработкой	1519,7	1780,2	2398,5	1899,5
2	Без обработки	764,6	762,9	698,3	741,9
	С обработкой	3423,5	2476,8	1931,1	2610,5
3	Без обработки	609,0	640,0	621,0	623,3
	С обработкой	2348,0	1483,9	1766,8	1866,2
4	Без обработки	553,4	354,4	855,3	587,7
	С обработкой	2154,3	2889,2	2467,7	2503,7
5	Без обработки	368,5	345,1	368,2	360,6
	С обработкой	754,1	786,0	900,5	713,5
6	Без обработки	418,6	355,3	344,4	372,8
	С обработкой	980,8	2418,5	2832,3	2077,2
7	Без обработки	404,5	370,4	361,7	378,9
	С обработкой	1407,2	960,5	860,7	1076,1
8	Без обработки	998,3	453,1	1287,9	913,1
	С обработкой	1133,4	1317,6	2302,8	1584,6
9	Без обработки	845,2	790,8	829,7	821,9
	С обработкой	2837,5	1854,6	2593,4	2428,5
10	Без обработки	529,3	648,6	458,9	545,6
	С обработкой	2948,5	3045,2	1392,0	2461,9

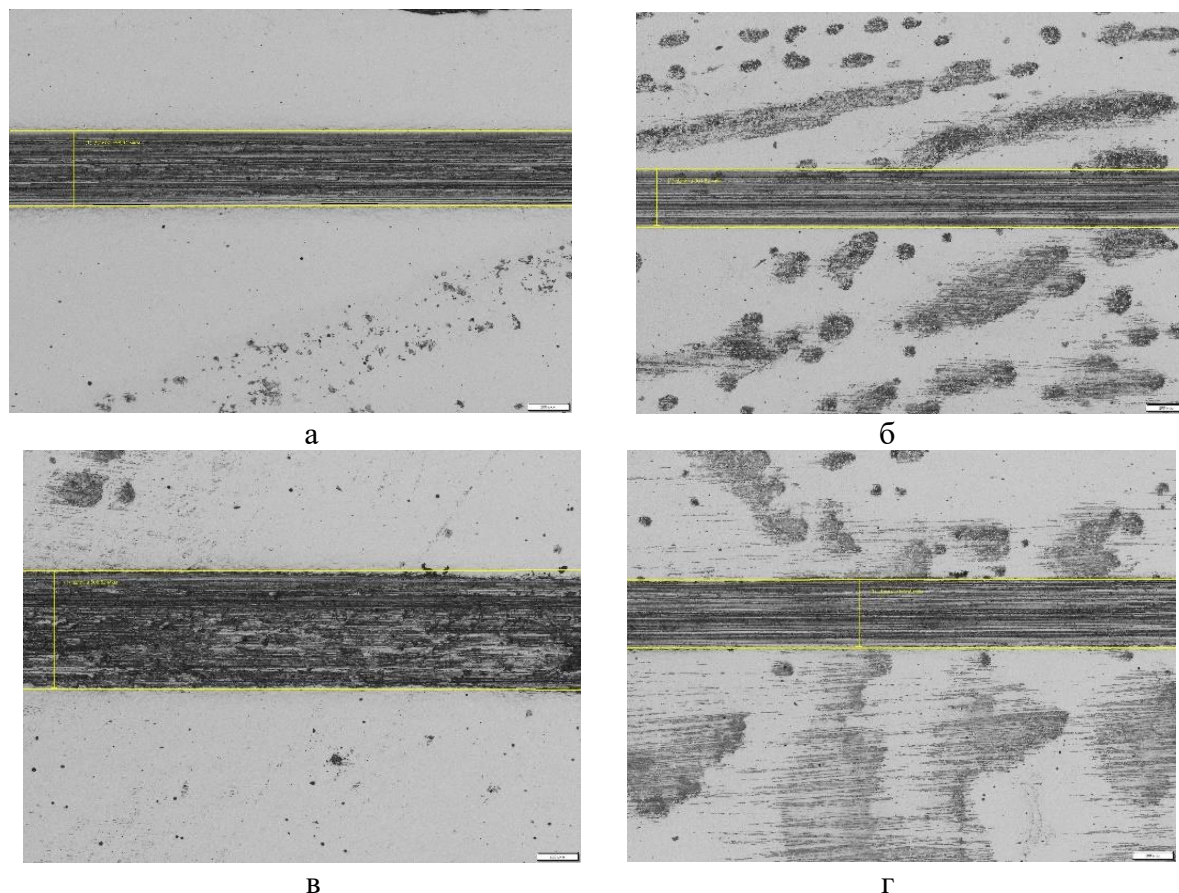
Таким образом, полученные результаты подтверждают перспективность применения плазменной обработки в качестве метода повышения износостойкости деталей из стали 65Г, эксплуатируемых в условиях интенсивных нагрузок и абразивного изнашивания.

4.3 Изменение поверхностной износостойкости стали в результате плазменной закалки

Износостойкость сталей, применяемых в деталях машин и рабочих органах сельскохозяйственной и почвообрабатывающей техники, является ключевым эксплуатационным параметром, определяющим срок их службы и надёжность функционирования. Сталь 65Г, обладающая высокой упругостью и ударной вязкостью, широко используется в таких условиях, однако её износостойкость в исходном состоянии часто недостаточна для длительной работы при повышенных контактных нагрузках и абразивном воздействии [132].

Оценка эффективности плазменной обработки требует количественного анализа параметров износа при различных уровнях нагрузки [133, 134]. В настоящей диссертационной работе проведены испытания стали 65Г по схеме

трения «шар–плоскость» при нагрузках 100 и 150 Н, что позволяет моделировать эксплуатационные условия с различной интенсивностью контактных усилий. Показателем износостойкости выбрана ширина износного трека b , отражающая интенсивность пластического деформирования и микрорезания поверхности (рисунок 32).



а – исходный образец при нагрузке 100 Н; б – закаленный образец при нагрузке 100 Н; в – исходный образец при нагрузке 150 Н; г – закаленный образец при нагрузке 150 Н

Рисунок 32 – Ширина износа трека

Таблица 21 – Результаты измерения ширины износного трека стали 65Г до и после плазменной заковки при нагрузках 100 и 150 Н

Нагрузка, Н	Значения ширины износа трека исходных образцов до плаз, мкм	Значения ширины износа трека закаленных образцов, мкм
100	398,94	301,82
100	392,97	310,79
100	401,19	318,47
150	606,63	430,44
150	588,70	437,62
150	601,85	449,38

По результатам испытаний (таблица 21 и рисунок 32) наблюдается существенное изменение характера изнашивания вследствие плазменной

закалки: при нагрузке 100 Н средняя ширина трека уменьшается с ~398–401 мкм до 302–318 мкм, а при нагрузке 150 Н – с ~589–607 мкм до 430–449 мкм (рисунок 33). Такое поведение указывает на выраженный упрочняющий эффект поверхности и повышение сопротивления контактному напряжению.

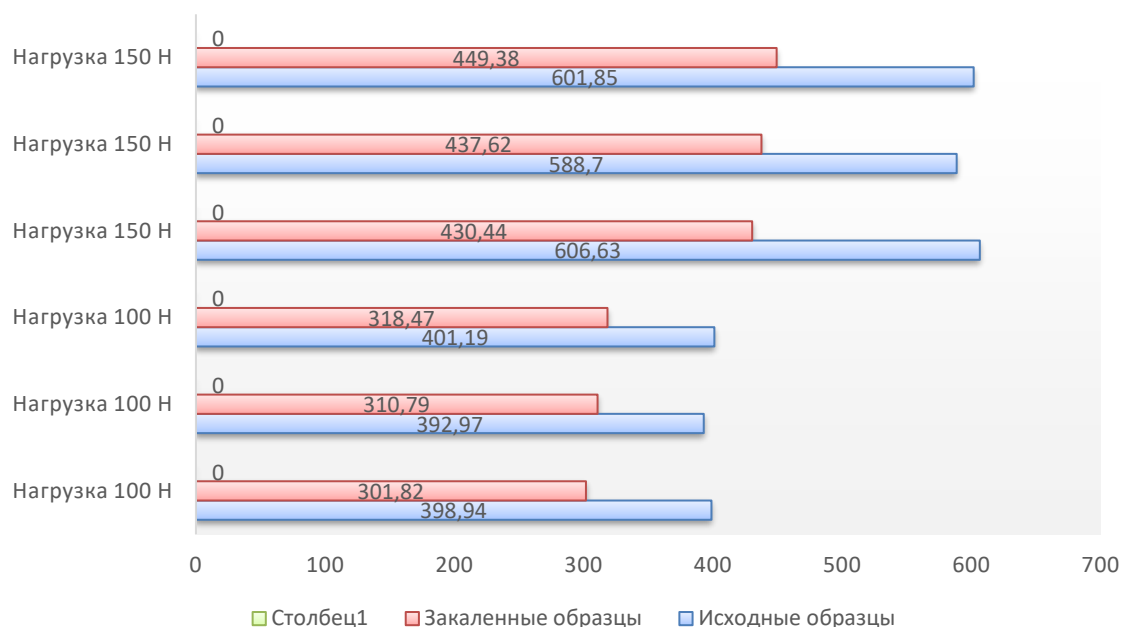


Рисунок 33 – Диаграмма изменения значений изнашивания стали 65Г до и после плазменной закалки при нагрузках 100 и 150 Н

Таким образом, проведенные исследования показывают, что плазменная закалка обеспечивает значительное повышение износостойкости стали 65Г: при нагрузке 100 Н ширина износного трека уменьшается в среднем на 23-25%, а при нагрузке 150 Н – на 28-30%, что обусловлено формированием высокодисперсной мартенситной структуры и увеличением сопротивления пластической деформации в поверхностном слое; полученные результаты подтверждают высокую эффективность плазменного упрочнения для повышения долговечности деталей, работающих в условиях повышенного трения и контактных нагрузок.

4.4 Оценка износостойкости лемехов плуга и лап культиватора при натурных испытаниях

Износ рабочих органов машин и механизмов может быть вызван воздействием агрессивных сред, большим перепадом температур и давлений, высокими вибрационными нагрузками и их различными комбинациями. Механизм разрушения рабочей поверхности контактирующих тел зависит от природы взаимодействующих тел и условий трения [135, 136].

В результате интенсивного абразивного износа изменяются геометрия режущей части и габаритные размеры инструментов, в связи с чем необходимо повышать твердость рабочих органов с помощью различных методов

упрочнения, и в то же время, разработать достоверные методы оценки износостойкости и долговечности [137].

Полевые испытания на износостойкость и долговечность были проведены на базе ТОО «Нур 777 КАС» (Северо-Казахстанская область, Аккайынский район Ивановский сельский округ).

Условия испытания:

- состав агрегата трактор К-70 + плуг ПЛН-8-35;
- МТЗ-3022 + КГШ-4.0;
- скорость движения агрегата 8,5...9,8 км/ч;
- тип почвы – среднесуглинистые чернозёмы с каменистыми включениями и легкосуглинистые с твердостью на глубине обработки (18...23 см) – 3,6...4,4 МПа, средний суглинок абсолютной влажности 14...16%;
- для испытаний опытных образцов лемехов использовалась низколегированная конструкционная сталь 65Г.

При оценке износостойкости почворезущих деталей были взяты параметры, наиболее подверженные износу (носовая часть, лезвие). Размеры рабочих органов измеряли по параметрам, указанным на рисунках 34,35.

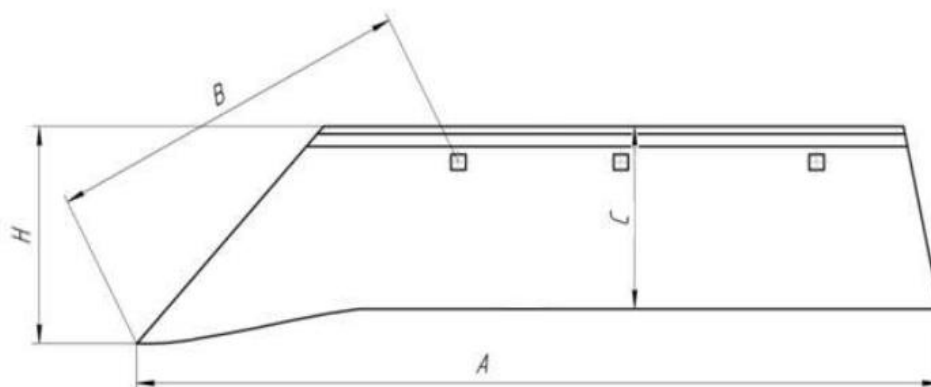


Рисунок 34 – Размеры рабочих органов лемеха плуга

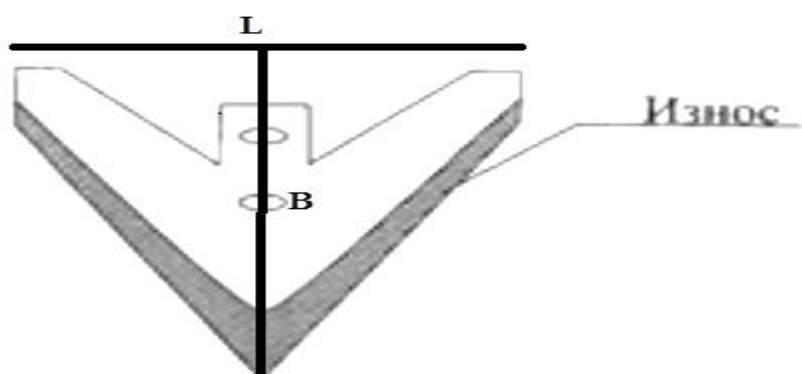


Рисунок 35 – Размеры рабочих органов лапы культиватора

В процессе испытаний контролировали: износ носка l , износ лемеха по толщине и износ по массе.

По результатам измерений, исходные детали показали наибольшую расположенность к истираемости. Параметрами, определяющими текущее состояние рабочих органов, являлись линейный износ носовой и лезвийной части.

В таблицах 22, 23 представлены контролируемые параметры лемехов плуга и лап культиватора (Испытания проводились циклично с наработкой по 1,3,5,7,9 га). Каждое измерение проводилось по 3 раза. За результат было взято среднее арифметическое значение каждого результата.

Таблица 22 – Результаты контролируемых параметров лемехов плуга

Контролируемые параметры, мм	Нарботка		Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4
	Н	Нач.	142	142	143	143
		500 га	140	142	142	143
		900 га	139	141	140	142
	А	Нач.	545	546	547	547
		500 га	543	545	546	547
		900 га	542	544	544	546
	В	Нач.	256	256	257	258
		500 га	255	255	255	257
		900 га	252	254	254	256
	С	Нач.	118,1	116	117	118
		500 га	114	115	115	118
		900 га	112	115	114	117

Таблица 23 – Результаты контролируемых параметров лап культиватора

Контролируемые параметры, мм	Нарботка		Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4
	В	Нач.	270	271	271	273
		500 га	269	270	269	272
		900 га	267	270	268	272
	L	Нач.	110	111	110	112
		500 га	109	110	109	112
		900 га	108	110	107	111

Таблица 24 – Потеря массы лемеха плуга, г

№ образца	1	1(1)	2	2(1)	3	3(1)	4	4(1)
Исходная масса, г	4945,5	4949,0	4920,3	4924,3	4938,9	4943,0	4930,6	4931,9
Нарботка 100 га / потеря массы, г	4911,1 / 34,4	4928,4 / 20,6	4883,8 / 36,5	4902,6 / 21,7	4910,9 / 28,0	4924,1 / 18,9	4898,8 / 31,8	4912,5 / 19,4
Нарботка 300 га / потеря массы, г	4858,7 / 86,8	4887,3 / 61,7	4830,6 / 89,7	4852,0 / 72,3	4858,5 / 80,4	4879,6 / 63,4	4848,3 / 82,3	4871,5 / 60,4
Нарботка 500 га / потеря массы, г	4823,9 / 121,6	4835,2 / 113,8	4793,0 / 127,3	4804,8 / 119,5	4813,1 / 125,8	4826,0 / 117,0	4811,2 / 119,4	4820,6 / 111,3
Нарботка 700 га / потеря массы, г	4788,8 / 156,7	4815,8 / 133,2	4771,3 / 149,0	4790,2 / 134,1	4790,6 / 148,3	4810,6 / 132,4	4779,8 / 150,8	4793,9 / 138,0
Нарботка 900 га / потеря массы, г	4774,5 / 171,0	4795,1 / 153,9	4751,7 / 168,6	4774,2 / 150,1	4768,9 / 170,0	4788,5 / 154,5	4760,0 / 170,6	4779,1 / 152,8

В таблицах 24, 25 представлены результаты потери массы лемехов плуга и лап культиватора. Детали 1, 2, 3 и 4 – исходные, детали 1(1), 2(1), 3(1) и 4(1) – детали, прошедшую поверхностную плазменную закалку.

Таблица 25 – Потеря массы лапы культиватора, г

№ образца	1	1(1)	2	2(1)	3	3(1)	4	4(1)
Исходная масса	1246,1	1250	1252,9	1253,8	1250	1254,9	1248,3	1251,7
Наработка 100 га / потеря массы, г	1173 / 73,1	1208,7 / 41,3	1160,4 / 92,5	1230,6 / 23,2	1170 / 80	1220 / 34,9	1165 / 83,3	1225 / 26,7
Наработка 300 га / потеря массы, г	1132,3 / 113,8	1190,2 / 59,8	1143 / 109,9	1192,7 / 61,1	1097 / 153	1180 / 74,9	1140 / 108,3	1185 / 66,7
Наработка 500 га / потеря массы, г	1072,7 / 173,4	1159,6 / 90,4	1094,2 / 158,7	1164,3 / 89,5	1050 / 200	1140 / 114,9	1035 / 213,3	1145 / 106,7
Наработка 700 га / потеря массы, г	1013,1 / 233	1132 / 118	993,7 / 259,2	1123 / 130,8	998 / 252	1110 / 144,9	1025 / 222,3	1115 / 136,7
Наработка 900 га / потеря массы, г	1033,5 / 212,6	1106,8 / 143,2	1024,5 / 228,4	1080,4 / 173,4	1014 / 236	1075 / 179,9	998 / 250,3	1070 / 181,7

Эксплуатационные испытания показали, что ресурс исходных, незакаленных лемехов и лап культиваторов при вспашке среднесуглинистых почв, составляет до 690-720 га. Потеря массы закаленных лемехов при наработке 900 га составил 152,9 г (ср.зн.), в то время как при той же наработке потеря массы исходных лемехов составила 245,0 г (ср.зн.). Та же динамика наблюдается по потере массы лап культиваторов (146,5 г и 250,1 г соответственно).



Рисунок 36 – Внешний вид обработанных лемехов плуга до и после полевых испытаний



Рисунок 37 – Внешний вид обработанных лемехов плуга до и после полевых испытаний

В соответствии с рисунками 36,37, представлен внешний вид обработанных лемехов плуга и лап культиватора до и после полевых испытаний.

Как видно из представленных результатов, во время проведения испытаний плазменно-закаленные лемеха и лапы культиваторов показали стабильное качество работы, без выявления возможных скрытых дефектов.

Наработка на закаленные детали в сверхтяжелых почвенно-климатических условиях со значительными каменистыми включениями составила более 820 га и после приведенной наработки они находятся в полностью работоспособном состоянии. Поломок и деформаций у плазменно-закаленных лемехов не было.

Таким образом, для продления эксплуатационного ресурса тяжело-нагруженных и поэтому быстроизнашивающихся деталей почвообрабатывающих машин рациональным по параметрам, универсальности, доступности, экологичности и экономической эффективности является поверхностная плазменная закалка. Данный вид закалки не меняет параметров шероховатости поверхности, малозатратна, производительна и позволяет эффективно увеличить эксплуатационный ресурс почворезущих деталей машин.

Исследования в области механики контактных взаимодействий в поверхностных и приповерхностных слоях трущихся материалов показывают, что материал в указанных слоях в процессе трения изменяет свое физическое состояние [138]. Процесс трения представляется, как результат двух взаимосвязанных процессов: деформации контактирующих микронеровностей и молекулярного взаимодействия материалов на пятнах фактического контакта. В процессе трения протекает процесс изнашивания. Существуют три стадии изнашивания (рисунок 38). Первый участок кривой (первая стадия I) представляет начальный период изнашивания, продолжительность которого невелика. Эта стадия называется приработкой трибосистемы, в течение которой трущиеся поверхности приспособляются друг к другу [139].

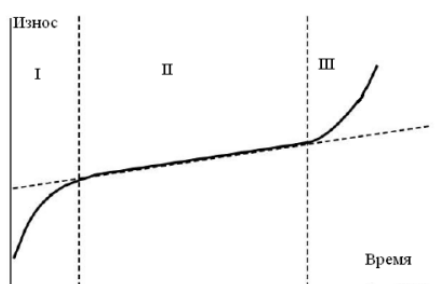


Рисунок 38 – Характерные стадии процесса изнашивания

На стадии приработки имеет место нестационарное состояние трибологической системы, которое сопровождается высокой интенсивностью изнашивания. Затем наступает стадия установившегося износа (стадия II), обладающая наибольшей продолжительностью. Она характеризуется стабильными условиями трения и практически постоянной и относительно низкой интенсивностью изнашивания. В ходе ее развития износ постепенно

увеличивается, что сопровождается повреждениями поверхности. В конечном итоге происходит значительное изменение условий трения, интенсивность износа резко возрастает и наступает катастрофический износ (стадия III).

4.5 Оценка трещиностойкости стали путем испытания на ударный изгиб и статического изгиба с анализом повреждаемости материала

Трещиностойкость группа параметров надежности, характеризующих способность материала тормозить развитие трещины. Количественная оценка трещиностойкости основывается на линейной механике разрушения [140]. В соответствии с линейной механикой разрушения очагами разрушения высокопрочных материалов являются небольшие трещины технологического происхождения (крепежные отверстия, недостаточный нагрев заготовки), а также трещиноподобные дефекты (неметаллические включения, скопление дислокаций и др.). Высокопрочные материалы, как и хрупкие, очень чувствительны к таким дефектам. Высокопрочные материалы хотя и обладают определенной пластичностью, для них реальную опасность представляют трещины критической длины. Оценку надежности высокопрочных материалов по размеру допустимого дефекта (меньше критического) проводят по критерию Ж. Ирвина [141].

Оценка трещиностойкости плазменно-упрочненной стали была проведена путем испытания на ударный изгиб с последующим осциллографированием. Значение ударной вязкости закаленных образцов составило 127, 116, 110, 104, 98, 106, 94 и 102 Дж/см².

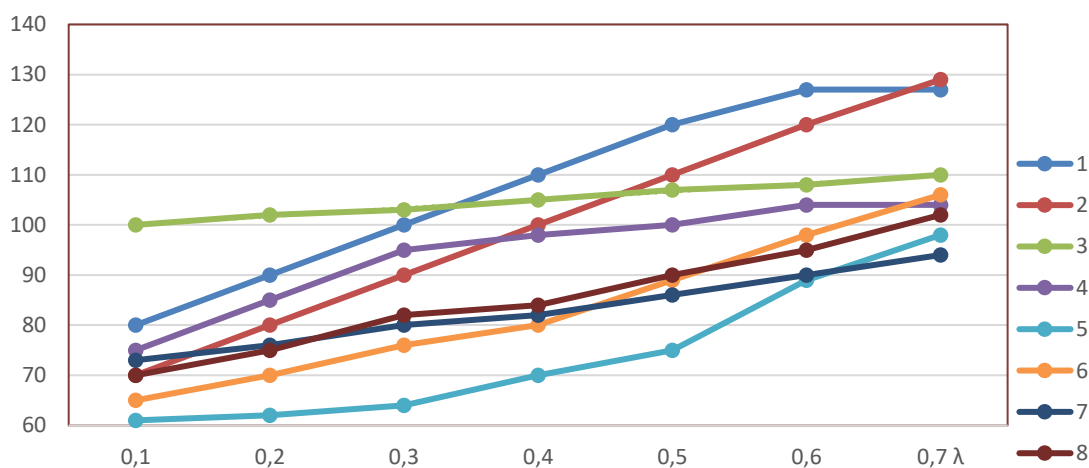


Рисунок 39 – Зависимость длины трещины от ударной вязкости

На рисунке 39 представлены результаты исследований зависимости длины трещины от ударной вязкости. Наблюдается постепенное увеличение ударной вязкости при увеличении трещины-инициатора.

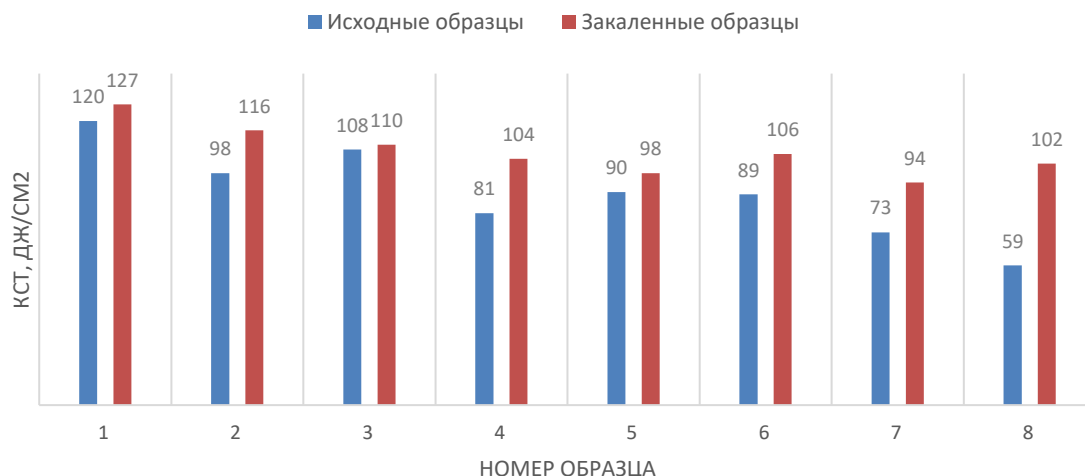


Рисунок 40 – Диаграмма динамической трещиностойкости

По результатам работ на излом и разрушения была рассчитана основная характеристика динамических испытаний – ударная вязкость KCT [142].

На рисунке 40 представлены результаты оценки ударной вязкости образцов стали 65Г до и после плазменной закалки, наблюдается динамичный рост КСТ после плазменной закалки, что свидетельствует о том, что плазменная закалка способствует торможению дальнейшего увеличения трещины за счёт увеличения КСТ. Таким образом, исходные образцы находятся в более хрупком состоянии, нежели закаленные, соответственно наблюдается значительное разрушение их в условиях плоской деформации.

При испытаниях образцов на сжатие наблюдалось перемещение трещин в диапазоне от 1,3-5,6 мм при линейной нагрузке до 120 кН (рисунки 41, 42).

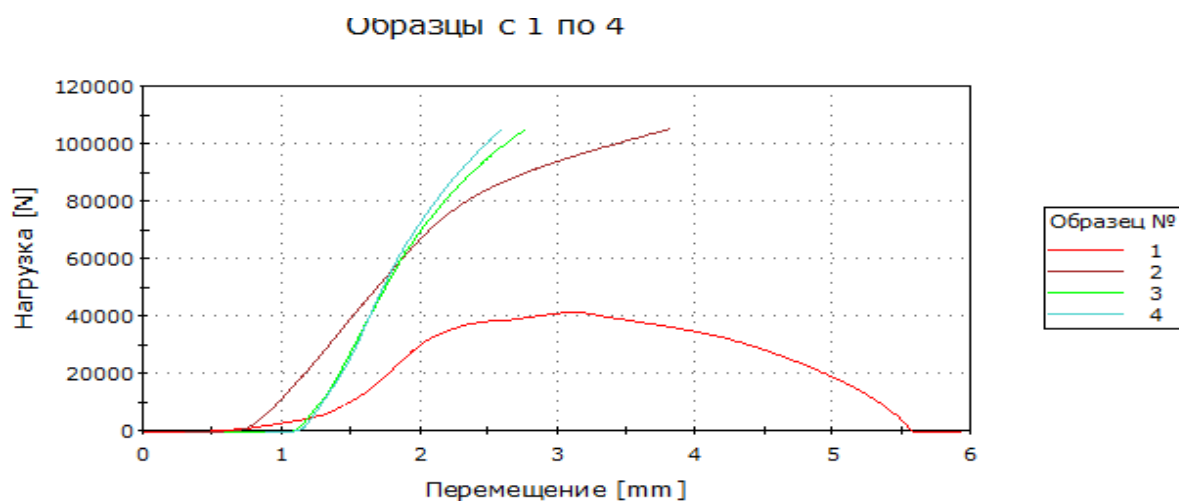


Рисунок 41 – Перемещение трещин (закаленные образцы 1-4)

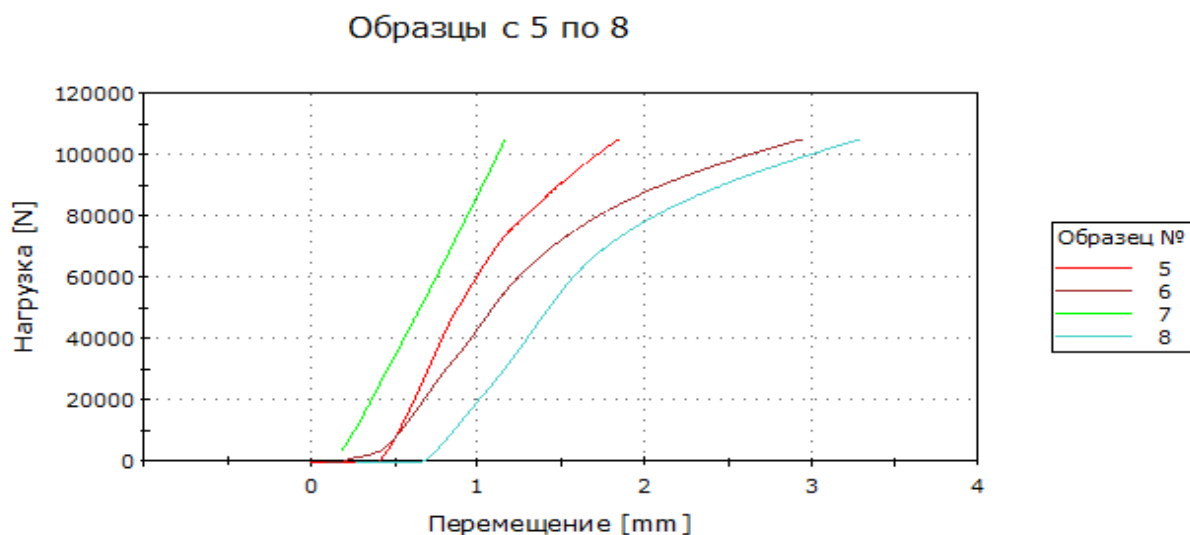


Рисунок 42 – Перемещение трещин (закаленные образцы 5-8)

В результате перемещения трещин видно, что площадь живого сечения образца уменьшилась незначительно и соответственно, наблюдался рост работы разрушения, A_p .

Следует учитывать, что если ударная вязкость двух сталей при равной температуре одинакова, то переход в хрупкое состояние зависит от их зернистости. Для мелкозернистой стали температурный порог хладноломкости значительно превышает этот показатель по сравнению с крупнозернистым строением [143, 144].

Плазменная закалка оказала выраженное положительное влияние на ударную вязкость (трещиностойкость) материала. В среднем, прирост составил +22.38 Дж/см², что эквивалентно увеличению на 26.4% по сравнению с исходными образцами. Наибольший прирост наблюдался у образца №8 – с 59 до 102 Дж/см² (рост на 73%), что указывает на эффективность закалки именно для материалов с изначально низкой трещиностойкостью. Минимальные изменения наблюдались у образцов с уже высоким исходным значением (например, образец №3: с 108 до 110 Дж/см²).

Оценка статического изгиба с анализом повреждаемости материала

Испытания на статический изгиб проводили на универсальной испытательной машине Walter Bai LFM-L10. Нагружение осуществляли при максимальной нагрузке 10 кН.

Образец устанавливали на две опоры с заданным пролётом. Нагрузка прикладывалась в центральной части образца по схеме трёхточечного изгиба при постоянной скорости перемещения траверсы, обеспечивающей монотонное и равномерное возрастание напряжённо-деформированного состояния (рисунок 43).

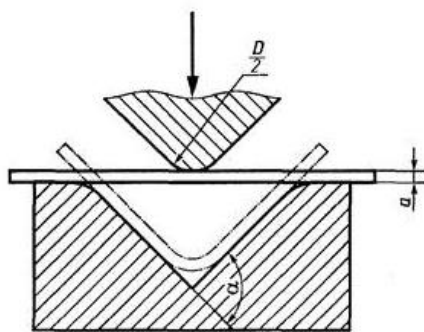


Рисунок 43 – Схема испытания на статический изгиб

Испытание на изгиб заключается в пластической деформации образца путем изгиба без изменения направления действия силы до достижения заданного угла изгиба [145]. По завершении испытаний проводили визуальный осмотр кромок и наружной поверхности изогнутой зоны образца. Далее выполняли микроструктурное исследование поверхности излома с применением оптической микроскопии с целью выявления трещин, сколов, а также признаков расслоения материала (рисунок 44).

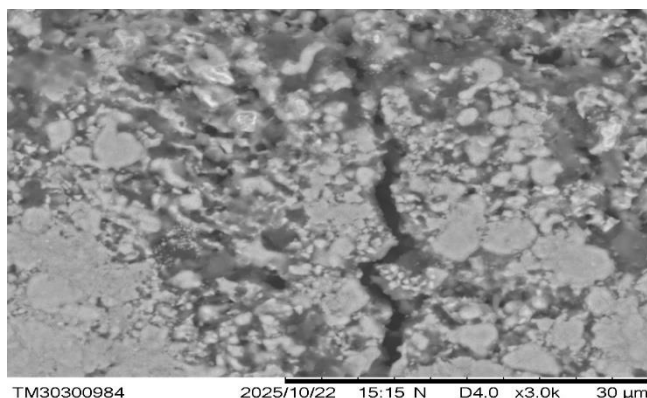


Рисунок 44 – Микроструктурное исследование поверхности расслоения металла

В результате испытаний на статический изгиб в незакалённых образцах были выявлены локальные повреждения поверхности, выражающиеся в формировании микротрещин и мелких сколов. На микроструктурном изображении поверхности деформированной зоны (рисунок 34) отчётливо наблюдается протяжённая трещина, ориентированная преимущественно вдоль направления максимальных изгибающих напряжений. Ширина раскрытия трещины составляет несколько микрометров, при этом её форма носит извилистый характер, что указывает на постепенное развитие повреждения в процессе квазистатического нагружения.

Дополнительно вблизи трещины фиксируются локальные нарушения сплошности поверхности в виде мелких сколов. Отсутствие признаков катастрофического разрушения и ограниченный характер выявленных дефектов свидетельствуют о том, что процесс повреждаемости на данной стадии нагружения реализуется преимущественно за счёт инициирования и стабильного

роста микротрещин. Наблюдаемая морфология дефектов указывает на локальную концентрацию напряжений и неоднородность пластической деформации в приповерхностных слоях материала.

Проведенная оценка образцов стали 65Г на трещиностойкость путем испытания на ударный изгиб с последующим осциллографированием и статический изгиб показала нам, что плазменная закалка способствует торможению увеличения трещины за счёт увеличения ударной вязкости и расслоению, таким образом, применение плазменной закали эффективно при поверхностном упрочнении стали марки 65Г, в частности лемехов плуга и лап культиватора, которые постоянно подвергаются механическим воздействиям, трению и износу.

4.6 Исследование повышения коррозионной стойкости стали после плазменной закали

При исследовании коррозионного поведения упрочненных образцов стали 65Г был использован весовой метод. Данный метод является наиболее простым в реализации и наглядным для определения коррозионной стойкости материалов. При использовании данного метода скорость коррозии материала характеризуется массовым показателем, который определяет массу прокорродировавшего материала на единице площади за единицу времени [146, 147].

Образцами в эксперименте выступали партии образцов из стали 65Г: образцы №1, 2, 3 неупрочненные; образцы №4, 5, 6 были упрочнены методом плазменной закали. Образцы были вырезаны с помощью отрезного станка CLD1325, который является высокоточным отрезным станком в виде параллелепипеда размерами 10×10×30 мм.

В качестве коррозионной агрессивной среды использовались водные растворы сульфата аммония и аммиачной селитры, так как данные компоненты являются основными составляющими удобрения для почвы и обладают высокой коррозионной активностью [148, 149]. Приготовленные агрессивные растворы имели следующие концентрации: 1 раствор - сульфат аммония 400 гр/л; 2 раствор - аммиачная селитра 300 гр/л. Влияние удобрений, таких как сульфат аммония и аммиачная селитра, на коррозию почворезущих машин во время вспашки связано с их химическим составом и поведением в почве. Данные виды удобрений образуют кислую среду при взаимодействии с почвенной влагой и провоцируют очаги коррозии (рисунок 45).

Известно, что на скорость процессов коррозии очень сильно оказывает влияние температура процесса. С повышением температуры процессы коррозионного разрушения протекают значительно быстрее. В этой связи ускоренные коррозионные испытания проводили при температурах 80°C [150, 151]. Результаты коррозионных испытаний, проведенных в растворе 1 (аммиачная селитра), приведены в таблице 26.



Рисунок 45 – Взвешивание массы образцов

Таблица 26 – Значения масс образцов до и после коррозионных испытаний в растворе 1

Номер и наименование образца		Масса образца		Площадь формирования коррозии, м ²
		до эксперимента m ₁ , г	после эксперимента m ₂ , г	
1	Сталь 65Г незакаленная	48,0475	48,0383	0,002036
2	Сталь 65Г незакаленная	49,8832	49,8691	0,002694
3	Сталь 65Г закаленная	42,6034	42,6022	0,000467
4	Сталь 65Г закаленная	49,4474	49,4417	0,002779

Таблица 27 – Значения масс образцов до и после коррозионных испытаний в растворе 2

Номер и наименование образца		Масса образца		Площадь формирования коррозии, м ²
		до эксперимента m _{1ср} , г	после эксперимента m _{2ср} , г	
1	Сталь 65Г незакаленная	50,0701	50,0516	0,003108
2	Сталь 65Г незакаленная	50,1566	50,1482	0,002503
3	Сталь 65Г закаленная	45,6986	45,6903	0,004508
4	Сталь 65Г закаленная	47,2414	47,2346	0,004451

В соответствии с таблицей 27, приведены результаты коррозионных испытаний, проведенных в растворе 2 (аммиачная селитра).

На основании значений таблиц 26, 27 были рассчитаны отрицательные показатели коррозии (таблицы 28, 29).

Таблица 28 – Показатели коррозии в растворе сульфата аммония

Номер образца	$\Delta m_{\text{ср}}, \text{ г}$	$\nu, \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$	Площадь формирования коррозии, м^2
1	0,0012	2,1	0,002036
2	0,0092	5,3	0,002694
3	0,0057	3,0	0,000467
4	0,0141	5,89	0,002779

Таблица 29 – Показатели коррозии в растворе аммиачной селитры

Номер образца	$\Delta m_{\text{ср}}, \text{ г}$	$\nu, \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$	Площадь формирования коррозии, м^2
5	0,0083	3,1	0,003108
6	0,0185	5,8	0,002503
7	0,0018	1,9	0,004508
8	0,0084	3,6	0,004451

Скорость коррозии вычисляется по следующей формуле (16):

$$\nu_k = \frac{\Delta m}{S \times t} \quad (16)$$

где S – площадь формирования коррозии;

Δm – величина массы, на которую изменилось количество металла;

t – время.

По результатам коррозионных испытаний незакаленных образцов стали 65Г в растворе сульфата аммония, выявлено, что скорость коррозии составляет 6,77 и 7,46, в то время как в упрочненных образцах наблюдается спад скорости коррозии в 1,36 раз (3,85 и 4,11 соответственно). Та же тенденция прослеживается и при коррозионных испытаниях в растворе аммиачной селитры. Здесь отмечается спад скорости коррозии в обработанных образцах в сравнение с не обработанными в 1,41 раз. Особенно выраженное снижение скорости коррозии наблюдается в растворе аммиачной селитры. Это связано с тем, что сульфат аммония является более агрессивным раствором. При его диссоциации в воде, образуются аммиак и серная кислота.

Улучшение коррозионной стойкости образцов, упрочненных плазменной закалкой связано с модифицированием поверхностного слоя с образованием мелкозернистой структуры. В результате образования мелкозернистой структуры увеличивается твердость материала, что ведет к значительному уменьшению очагов коррозии за счет повышения сопротивления к механическим повреждениям и царапинам. Также процесс закалки способствует повышению плотности металла в результате закрытия или значительного уменьшения пор и микротрещин.

Выводы к разделу

Проведённые исследования показали, что плазменная обработка обеспечивает формирование упрочнённого поверхностного слоя стали 65Г глубиной около 1,22-1,23 мм, сопровождающегося значительным ростом микротвёрдости. В результате плазменной закалки твёрдость поверхности увеличилась в среднем в 3,5 раза, что связано с образованием мелкодисперсной мартенситной структуры и ростом плотности кристаллических дефектов. Существенно повысилась и износостойкость материала: ширина износного трека при трибологических испытаниях уменьшилась на 27–30% в зависимости от нагрузки. Натурные испытания лемехов и лап культиватора подтвердили снижение потери массы у плазменно-упрочнённых деталей в 1,3 раза, что увеличивает их ресурс при работе в тяжёлых почвенных условиях. Дополнительно установлено, что плазменная закалка повышает ударную вязкость стали 65Г в среднем на 26%, улучшая её трещиностойкость и способность препятствовать распространению трещин. Формирование в поверхностных слоях мартенситно-трооститной структуры обеспечивает одновременно высокую твёрдость и достаточную вязкость, что особенно важно для деталей, работающих при ударных и абразивных нагрузках. В целом полученные результаты подтверждают высокую эффективность плазменной закалки как универсального, экономичного и технологически доступного метода увеличения ресурса и надёжности рабочих органов почвообрабатывающей техники.

Проведённые гравиметрические коррозионные испытания показали, что плазменная закалка способствует снижению площади корродируемой зоны, а также снижению скорости коррозии конструкционной стали более чем 1,2 раза, что говорит о комплексном эффекте плазменной обработки: не только механическое упрочнение, но и пассивирующее влияние на взаимодействие стали с агрессивной химической средой. В таблице 30 представлены сравнительные показатели качества до и после плазменной закалки стали 65Г.

Исследованы закономерности формирования и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей, установлено образование градиентного поля сжимающих напряжений величиной до 353–440 МПа в приповерхностной зоне, способствующих повышению трещиностойкости и эксплуатационной долговечности лемехов плугов.

Разработаны технологическая инструкция плазменной закалки лемехов плугов и стандарт организации СТО ТОО 190740006823-01-2026 «Плазменная закалка изделий из углеродистых конструкционных сталей».

Таким образом, плазменное упрочнение поверхности может рассматриваться как эффективный способ повышения коррозионной стойкости, долговечности и эксплуатационного ресурса почворезущих машин.

Таблица 30 – Сравнительная характеристика исходных и плазменно-закалённых образцов стали 65Г

Показатель	Условия испытаний	Исходные образцы (до плазменной закалки)	Плазменно-закалённые образцы	Эффект плазменной закалки
Ширина износа трека, мкм	Нагрузка 100 Н	397,7 (ср.)	321,0 (ср.)	Уменьшение износа на 25%
	Нагрузка 150 Н	605,4 (ср.)	387,1 (ср.)	Уменьшение износа на 23%
Микротвёрдость HV30, кгс/мм ²	Поверхностный слой	630–915 (ср. 680)	1076–3870 (ср. 2140)	Увеличение микротвердости в 3–4 раза
Ударная вязкость, Дж/см ²	Комнатная температура	59–108	102–110	Увеличение ударной вязкости в среднем на 26,4%
Скорость коррозии v , г/м ² ·ч	Раствор (NH ₄) ₂ SO ₄	4,88	2,31	Уменьшение скорости коррозии на 26,7%
Скорость коррозии v , г/м ² ·ч	Раствор NH ₄ NO ₃	4,66	2,41	Уменьшение скорости коррозии на 29,2%
Потеря массы лемеха плуга при трении, г	Наработка 9 Га	245,0	153,1	Уменьшение износа на 28,9%
Потеря массы лапы культиватора при трении, г	Наработка 9 Га	146,5	250,0	Уменьшение износа на 31,18%

Полученные экспериментальные результаты создают научно-практическую основу для оценки эффективности внедрения разработанной технологии в производственные условия. В связи с этим в следующем разделе рассматриваются эксплуатационные и экономические аспекты применения плазменной закалки при изготовлении и ремонте рабочих органов сельскохозяйственных машин.

5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДА ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ

5.1 Оценка технико-экономической эффективности технологии упрочнения

Как один из стратегических секторов, сельское хозяйство требует повышения продуктивности, надёжности и энергоэффективности технических средств, обеспечивающих обработку почвы, посев, уборку и транспортировку сельхозпродукции. Одним из важнейших направлений повышения эффективности сельхозпроизводства является улучшение эксплуатационных характеристик рабочих органов сельскохозяйственной техники, в частности – лемехов плугов и лап культиваторов, на которые приходится наибольшая доля износа при проведении полевых работ. Износ этих деталей ведёт не только к снижению качества обработки почвы, но и к увеличению затрат на ремонт, обслуживание, простоя машин и, как следствие, к удорожанию производимого сырья [152, 153].

С позиции экономической эффективности, внедрение технологии плазменной закалки даёт: увеличение срока службы изделий в 1,5 раза, снижение затрат на закупку запасных частей, уменьшение простоев техники в сезон, повышение урожайности за счёт более равномерной обработки почвы [154].

Кроме того, локализация таких процессов на базе отечественных ремонтных заводов полностью соответствует целям импортозамещения и диверсификации обрабатывающей промышленности, обозначенным в рамках Концепции развития машиностроения Республики Казахстан до 2030 года [155, 156].

Таким образом, плазменная закалка обеспечивает не только повышение технических характеристик, но и вносит значительный вклад в экономическую эффективность эксплуатации сельхозмашин.

Ниже представлены затраты на капитальные вложения по установке плазменной закалки УДГЗ-200. В таблице 31 представлены данные по капитальным вложениям по установке плазменной закалки УДГЗ-200.

Таблица 31 – Капитальные вложения по установке плазменной закалки УДГЗ-200

Наименование элемента установки	Стоимость, тенге
Установка плазменной закалки УДГЗ-200	3 500 000
Система водяного охлаждения (чиллер, насос, бак)	1 100 000
Источник питания (ИП-200, ток до 400 А)	700 000
Комплект механизации подачи детали	500 000
Газовая система (аргон)	1 100 000
Контрольно-измерительные приборы (пирометр, твердомер, ШЦ)	200 000
Монтаж и пусконаладочные работы	400 000
Программирование режимов и наладка блока управления	250 000
Резерв и прочие расходы	250 000
ИТОГО (капитальные вложения)	8 000 000

Для определения технико-экономической эффективности использования упрочненных лемехов плуга или стрельчатых лап культиваторов по сравнению с существующим аналогом на базе проведенных исследований проведен сбор необходимой информации. Исходные данные затрат на детали без закалки и с плазменной закалкой приведены в таблице 32. Расчёты выполнены для хозяйства площадью 1000 га.

Таблица 32 – Исходные данные затрат на детали без закалки и с плазменной закалкой

Параметр	Обозначение	Значение	
		Лемехи плуга	Лапы культиватора
Обрабатываемая площадь	S	1000 га	
Расход деталей без закалки, на 100 га	N ₁	9,6	19,2
Расход деталей с закалкой, на 100 га	N ₂	8,0	16,0
Себестоимость детали без закалки	C ₁	9100 тг.	3500 тг.
Себестоимость детали с закалкой	C ₂	12800 тг	4600 тг
Затраты на энергию и труд (на 1 деталь)	Z	1000 тг.	500 тг.

Годовые затраты на детали без закалки: $Z_1 = N_{\text{год1}} \times C_1 = 160 \times 9100 = 1\,456\,000$ тг. Годовые затраты на детали с плазменной закалкой (с учётом энергии и труда): $Z_2 = N_{\text{год2}} \times (C_2 + Z) = 80 \times (11800 + 1000) = 80 \times 12800 = 1\,024\,000$ тг.

Абсолютная экономия по деталям (лемехи плуга): $1\,456\,000 - 1\,024\,000 = 432\,000$ тг; $1\,120\,000 - 736\,000 = 384\,000$ тг. Средняя абсолютная экономия составляет 408 000 тг

Таблица 33 – Исходные данные для экономических расчётов

Параметр	Обозначение	Значение	
		Лемехи плуга	Лапы культиватора
Затраты на детали без плазменной закалки (1 000 га)	Z ₁	1 456 000 тг	1 120 000 тг
Затраты на детали с плазм. закалкой (1 000 га, включая энергию)	Z ₂	1 024 000 тг	736 000 тг
Доля годовой амортизации оборудования (8 000 000 тг / 5 лет)	A _e	1 600 000 тг/год	
Нагрузка на одно хозяйство (1 000 га из 10 000 га общей)	k	0.1	
Дополнительные амортиз. затраты на хозяйство	A = A _e · k	60 000 тг/год	
Капвложения в установку плазменной закалки	K	8 000 000 тг	

Полные расходы на приобретение, монтаж и запуск установки УДГЗ-200 составляют 8 000 000 тенге (таблица 33).

Относительный экономический эффект определяется по следующей формуле (17) [157]:

$$E_{\text{отн}} = \frac{\Delta Z_{\text{ср}}}{Z_{1\text{ср}}} \times 100\% = \frac{408\,000}{1\,288\,000} \times 100\% \approx 31,7\% \quad (17)$$

Рентабельность капитальных вложений:

$$R = \frac{\Delta Z_{\text{ср}}}{K} \times 100 = \frac{408\,000}{8\,000\,000} \times 100\% = 5,1\% \quad (18)$$

При полном использовании установки (10 000 га):

$$\Delta Z_{\text{общ}} = 408\,000 \times 10 = 4\,080\,000 \text{ тг/год}, R_{\text{общ}} = 4\,080\,000 / 8\,000\,000 \times 100 = 51\%$$

Срок окупаемости находим по следующему расчету:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{\Delta Z_{\text{общ}}} = \frac{8\,000\,000}{4\,080\,000} \approx 2 \text{ года} \quad (19)$$

Срок окупаемости оборудования плазменной закалки составляет 2 года, что укладывается в срок службы оборудования (10 лет).

Таким образом, относительный экономический эффект от плазменной закалки почвообрабатывающих машин для хозяйства площадью 1000 га составляет 31,7%, рентабельность капитальных вложений 5,1%, срок окупаемости 2 года. Полученные показатели подтверждают высокую окупаемость инвестиций и устойчивость внедрения данной технологии в сельхозпредприятиях различных масштабов.

5.2 Повышение производственно-эксплуатационных показателей за счёт внедрения плазменной закалки в оптимальных режимах

Экономическая эффективность плазменной закалки определяется не только затратами на детали, но и ресурсом и трудоемкостью монтажа и замены деталей почвообрабатывающих машин, а также их преждевременным выходом из строя [157].

Трудозатраты на замену и монтаж были рассчитаны по следующей формуле (20):

$$T = N \times t \quad (20)$$

где T – общие трудозатраты на замену, чел.·ч.;

N – количество заменяемых деталей (лемехов и лап);

t – время на замену одной детали, чел.·ч.

Трудозатраты на замену и монтаж исходных лемехов и лап без закалки составило 4,0 и 6,4 ч/лемех соответственно. В закаленных деталях наблюдается спад данных показателей в 2 раза.

Результаты расчетов представлены в таблице 34.

Таблица 34 – Производственные показатели деталей (на 1000 га)

Показатель	Лемех плуга (без закалки)	Лемех плуга (с закалкой)	Лапа культиватора (без закалки)	Лапа культиватора (с закалкой)
Расход на 1000 га, шт	9,6	8	19,2	16
Средний ресурс до предельного износа, га	720	870	740	900
Трудоемкость монтажа/замены, чел·ч (0,25 ч/лемех; 0,2 ч/лапа)	2,4	2,0	3,84	3,2
Средний преждевременного выхода из строя %	7,1 %	5 %	5,7 %	4 %
Себестоимость 1 детали, тг	9100	12800	3500	4600
Общие затраты на закупку, тг	146286	102400	105143	73600
Затраты на обслуживание, тг	3429	2400	5486	3840
Экономия по закупке и обслуживанию, тг	44915		33189	

Из рассчитанных данных наблюдается увеличение среднего ресурса до предельного износа в 1,25 раза; снижение объёма закупок и процент преждевременных отказов на 29%. При расчёте совокупных затрат на покупку и обслуживание рабочих органов наблюдается экономия в 30-40%.

Таким образом, применение плазменной закалки рабочих органов почвообрабатывающей техники представляет собой не только эффективное техническое решение, но и важный элемент экономической трансформации аграрного сектора.

Выводы к разделу

Эксплуатационные испытания показали, что срок службы деталей, подвергнутых плазменной закалке, может увеличиваться в 2 раза по сравнению с традиционной объемной термообработкой или цементацией. Это обусловлено формированием мелкозернистой мартенситной структуры на поверхностном слое и снижением остаточных напряжений. В результате снижается износ, уменьшается частота замены, повышается коэффициент технической готовности агрегатов.

С экономической точки зрения применение плазменной закалки оправдано в условиях серийного или массового производства. Установка УДГЗ-200, позволяет достичь высокой повторяемости и автоматизации процесса при умеренных эксплуатационных затратах. При правильной организации участка срок окупаемости подобного оборудования может составлять менее трех лет,

особенно в случае обработки большого объёма сменных рабочих органов почворежущих машин.

Кроме того, использование метода локальной закалки снижает потребление электроэнергии и охлаждающих жидкостей, сокращает технологические потери и повышает экологическую устойчивость производства. Таким образом, плазменная закалка становится не только технологически эффективным, но и экономически выгодным направлением модернизации ремонта и изготовления сельскохозяйственных машин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования подтвердили, что применение плазменной закалки является эффективным направлением повышения качества поверхностного слоя тяжело-нагруженных деталей почвообрабатывающих машин. Установлено, что формирование упрочнённого слоя с мелкодисперсной мартенситной структурой обеспечивает значительное повышение твёрдости, износостойкости и трещиностойкости стали 65Г при сохранении достаточной вязкости сердцевины. Проведённый анализ показал, что оптимизация режимов плазменной обработки позволяет формировать благоприятное распределение остаточных сжимающих напряжений, способствующее увеличению эксплуатационного ресурса деталей. Результаты лабораторных и натурных испытаний подтвердили снижение потери массы и увеличение срока службы лемехов плуга и лап культиватора, что свидетельствует о высокой эффективности разработанной технологии. С позиции стандартизации и управления качеством доказано, что внедрение регламентированных режимов плазменной закалки и разработанного стандарта организации обеспечивает стабильность технологического процесса и воспроизводимость показателей качества продукции.

В диссертационной работе были выполнены следующие задачи:

1. Выполнен анализ существующих методов упрочнения тяжело-нагруженных деталей почвообрабатывающих машин и теоретический анализ плазменных процессов.

2. Проведён FMEA-анализ с оценкой критичности отказов деталей и определением приоритетных направлений повышения их надёжности, в результате которого выявлено что наибольший уровень риска для лемеха плуга ($RPN=245$) связан с износом носка и затуплением лезвия, а для лапы культиватора – с износом режущей кромки ($RPN=280$).

3. Исследовано влияние плазменной закалки на структуру и свойства материалов, в результате чего установлены закономерности формирования упрочнённого слоя. Установлено, что формирование в поверхностном слое неоднородной мартенситно-трооститной и троосто-сорбитной структуры обеспечивает одновременно высокую твердость и достаточную вязкость, что особенно важно для деталей, работающих при ударных и абразивных нагрузках.

4. Разработана регрессионная модель по межфакторным варьируемым параметрам режима плазменной закалки, описывающая влияние режимов плазменной закалки на механические и эксплуатационные свойства тяжело-нагруженных деталей из стали 65Г, что позволило оптимизировать технологические параметры процесса. Оптимальный режим составил следующие показатели: сила тока – 140 А; скорость перемещения горелки – 4 мм/с, напряжение дуги – 55 В; расстояние от горелки до поверхности – 6 мм.

5. Проведена комплексная оценка эксплуатационных и физико-химических характеристик упрочнённых деталей, включая определение твёрдости поверхности, глубины упрочнённого слоя, износостойкости, ударной вязкости и коррозионной стойкости. Наблюдается повышение твёрдости

поверхности в 3,1 раза, увеличение износостойкости на 25-30%. Комплексные натурные испытания лемехов плуга и лап культиватора показали уменьшение потери массы у плазменно-закалённых деталей в 1,4–1,5 раза и увеличение ресурса их работы в тяжёлых почвенных условиях свыше 9 га. Исследование трещиностойкости выявило повышение ударной вязкости в среднем на 26%, что свидетельствует о снижении склонности к хрупкому разрушению и повышении надёжности материала при динамических нагрузках

6. Разработан стандарт организации, регламентирующий полный цикл плазменной закалки конструкционных углеродистых сталей от подготовки поверхности до контроля качества, обеспечивая воспроизводимость эксплуатационных характеристик изнашиваемых деталей. Разработана технологическая инструкция по плазменному упрочнению лемехов плугов, которая позволяет стандартизировать процесс упрочнения лемехов плугов и лап культиваторов на установке УДГЗ-200, и тем самым повысить износостойкость, твёрдость и долговечность рабочих органов сельскохозяйственной техники при одновременном снижении вероятности технологических дефектов.

7. Установлено, что в результате плазменной закалки в приповерхностной зоне формируются остаточные сжимающие напряжения величиной 353-440 МПа, обеспечивающие благоприятное напряжённое состояние поверхностного слоя, препятствующее зарождению и развитию трещин.

8. Определен относительный экономический эффект от внедрения плазменной закалки почвообрабатывающих машин. Экономический эффект для хозяйства площадью 1000 га составляет 31,7%, рентабельность капитальных вложений 5,1%, срок окупаемости 2 года.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Постановление Правительства Республики Казахстан. Об утверждении Концепции развития агропромышленного комплекса Республики Казахстан на 2021–2030 годы: утв. 30 декабря 2021 года, №960 // <https://adilet.zan>. 10.06.2025.
- 2 Постановление Правительства Республики Казахстан. Об утверждении Комплексного плана по развитию машиностроительной отрасли Республики Казахстан на 2024-2028 годы: утв. 7 ноября 2023 года, №991 // <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2300000991>. 10.06.2025.
- 3 Сидоров С.А., Миронов Д.А. Повышение технического уровня и эксплуатационных характеристик высоконагруженных рабочих органов сельхозмашин // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2021. – №1. – С. 14-17.
- 4 ГОСТ 14.320-81. Единая система технологической подготовки производства. Виды сборки. – Введ. 1982-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 10 с.
- 5 Кузнецов С.А., Серов А.В., Жуков А.П. Повышение ресурса рабочих органов сельскохозяйственных машин за счёт упрочнения плазменной обработкой // Вестник машиностроения. – 2023. – №6. – С. 54-58.
- 6 Миронов Д.А., Лискин И.В., Сидоров С.А. Износостойкость и долговечность материалов стрельчатых лап культиватора // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2018. – №10. – С. 36-37.
- 7 Бернштейн Д.Б. Абразивное изнашивание лемешного лезвия и работоспособность плуга // Тракторы и сельхозмашины. – 2002. – №6. – С. 40-45.
- 8 Иванов А.В., Петров С.Н. Износостойкость рабочих органов почвообрабатывающих машин. – М.: Машиностроение, 2015. – 256 с.
- 9 Кузнецов И.П. Методы упрочнения деталей сельскохозяйственных машин // Сельскохозяйственные машины. – 2018. – №4. – С. 85-95.
- 10 Brown R., Smith J. Wear mechanisms of agricultural tools: Abrasion, adhesion, and corrosion // Wear. – 2014. – Vol. 318-319. – P. 210-220.
- 11 Müller H. Soil abrasiveness and wear of agricultural tools // Journal of Agricultural Engineering Research. – 2016. – Vol. 45, Issue 3. – P. 140-155.
- 12 Zhang L., Wang T. Analysis of wear patterns in cultivator tines under different soil conditions // International Journal of Agricultural Machinery. – 2019. – Vol. 10, Issue 2. – P. 70-85.
- 13 Evans C., Smith, J. Wear mechanisms of agricultural tillage tools in abrasive soils // Wear. – 2017. – Vol. 376-377. – P. 20-28.
- 14 Fechete-Tutunaru L.V. et al. Soil-tool interaction of a simple tillage tool in sand // E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 85. – P. 08007.
- 15 Иванов И.В., Петров С.Н. Износостойкость рабочих органов сельскохозяйственных машин // Машиностроение. – 2018. – №7. – С. 75-80.
- 16 Кузнецов А.А., Морозов В.В. Особенности износа и коррозии деталей почвообрабатывающих машин // Техническая механика и износостойкость. – 2019. – Т. 23, №2. – С. 85-95.

- 17 Хасан Н.А., Канаев А.Т. Исследование влияния плазменного упрочнения на износостойкость тяжело нагруженных деталей сельхозмашин // Молодой исследователь: вызовы и перспективы: сб. ст. по материалам 255-й междунар. науч.-практ. конф. – М., 2022. – С. 156-164.
- 18 Ахметшин Т.Ф. Повышение износостойкости и долговечности почвообрабатывающих рабочих органов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2013. – №3(41). – С. 81-84.
- 19 Ерохин М.Н., Новиков В.С., Валежникова Е.В. и др. Об оценки эффективности рабочих органов почвообрабатывающих машин // Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. – 2013. – №4. – С. 99-106.
- 20 Кончин В.А. Повышение эффективности процесса восстановления рабочих органов почвообрабатывающих машин плазменно-порошковой наплавкой твердосплавных электроэрозионных материалов: дис. ... канд. техн. наук: 4.3.1. – Курск, 2024. – 185 с.
- 21 Слинко Д.Б., Костомахин М.Н. Упрочнение рабочих органов сельскохозяйственных машин // Панорама научных исследований. – 2025. – №1. – С. 24-29.
- 22 Коняева Н.И., Коняев Н.В. К обзору способов восстановления изношенных органов почвообрабатывающих машин // Современные материалы, техника и технологии. – 2023. – №1(46). – С. 60-65.
- 23 Севернев М.М. Износ и коррозия сельскохозяйственных машин. – Минск, 2018. – 320 с.
- 24 Перелыгин Ю.П., Лось И.С., Киреев С.Ю. Коррозия и защита металлов от коррозии. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2012. – 81 с.
- 25 Лузан С.А., Петренко Д.Н. Повышение износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: матер. междунар. науч.-практ. конф. – Минск, 2019. – С. 79-81.
- 26 Украинскиц И.С., Каменчуков А.В., Павликов А.Б. Инженерная геология. – Хабаровск, 2022. – 203 с.
- 27 Алванян А.К., Алванян К.А. Инженерная геология месторождений полезных ископаемых. – Пермь, 2023. – 136 с.
- 28 Почвоведение / под ред. К.Ш. Казеева С.И. Колесникова. – М.: Юрайт, 2025. – 427 с.
- 29 Кретинин В.И., Теппоев А.В. Оценка прочности кромки лезвий почворежущих деталей лесохозяйственных машин // Состояние и перспективы развития лесного комплекса в странах СНГ: сб. ст. 2-й междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2022. – С. 42-46.
- 30 Даманский Р.В. Исследование особенностей износа режущей кромки стрельчатых лап культиваторов из сталей 65Г и 20 при испытаниях в почвенном канале // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2024. – №4(234). – С. 85-92.
- 31 Рыжков А.Ф., Рыжков С.Н. Повышение износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин. – М.: ФИРО, 2015. – 192 с.
- 32 Канаев А.Т., Жусин Б.Т., Сарсембаева Т.Е. и др. Плазменная закалка

сменных деталей рабочих органов повышения износостойкости деталей рабочих органов почворежущих машин // Технология машиностроения. – 2017. – №10. – С. 31-36.

33 Михальченков А.М., Бардадын Н.А., Лещев М.О. и др. Процесс износа лемехов компании «Лемкен», восстановленных приваркой термоупрочнённой режуще-лезвийной области // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2023. – №5(99). – С. 63-67.

34 Азгальдов Г.Г., Квятковский В.В., Березин А.И. Управление качеством продукции в машиностроении: теория и практика. – М., 2017. – 368 с.

35 Saihi A. et al. Quality 4.0: leveraging Industry 4.0 technologies to improve quality management practices – a systematic review // International Journal of Quality & Reliability Management. – 2023. – Vol. 40, Issue 2. – P. 628-650.

36 Kumar R., Ganesh L.S., Rajendran C. From total quality management to Quality 4.0: a systematic literature review and future research agenda // Frontiers of Engineering Management. – 2022. – Vol. 9, Issue 4. – P. 587-604.

37 Neyestani B. Principles and Contributions of Total Quality Management (TQM) Gurus on Business Quality Improvement // <https://zenodo.org>. 10.06.2025.

38 Азгальдов Г.Г. Качество: проблемы и решения. – М., 1991. – 256 с.

39 Феськов С.А., Силаев А.Л., Погоньшев В.А. Критический анализ особенностей конструкции составных плужных лемехов // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2025. – №2(108). – С. 50-56.

40 Zandi P., Rahmani M., Hanian M. et al. Agricultural risk management using fuzzy TOPSIS analytical hierarchy process (AHP) and failure mode and effects analysis (FMEA) // Agriculture. – 2020. – Vol. 10, Issue 11. – P. 504.

41 ISO 9000:2015. Quality management systems – Fundamentals and vocabulary. – Ed. 4th. – Geneva, 2015. – 51 p.

42 Marques P.A., dos Reis J.C.G., Pinto F.S. et al. Lean, Six Sigma and ISO Management Systems Standards: An Integration Framework // Procceed. internat. conf. on Quality Engineering and Management. – Girona (Spain), 2024. – P. 435-465.

73 Patyal V.S., Maddulety K. Interrelationship between Total Quality Management and Six Sigma: A Review // Global Business Review. – 2015. – Vol. 16, Issue 6. – P. 1021-1034.

44 Панфилов Д.О. Анализ методов управления качеством // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2023. – №1-2(95). – С. 53-57.

45 Грязнов С.А., Грязнов Н.С. Применение диаграмм Парето и Исикавы для повышения качества работ или услуг // Социально-экономические процессы современного общества к 80-лет. Л.П. Куракова: всерос. науч.-практ. конф. – Самара, 2023. – С. 122-123.

46 Kumah D.B., Forkuo-Minka E. Cause-and-Effect (Fishbone) Diagram: A Tool for Generating and Organizing Quality Improvement Ideas // Global Journal on Quality and Safety in Healthcare. – 2023. – Vol. 7, Issue 2. – P. 85-87.

47 Иванов С.Н., Кузнецова Е.В. Технологии плазменной обработки поверхностей и их роль в повышении эксплуатационных характеристик материалов // Вестник Казанского технического университета. – 2022. – Т. 25, №2. – С. 89-98.

- 48 Бычков В.В., Рогожин А.М. Основные методы плазменной обработки материалов и перспективы их применения в машиностроении // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 2021. – №3. – С. 45-53.
- 49 Кравченко Н.Н., Пузряков А.Ф., Пузряков А.А. Плазменные методы упрочнения и восстановления рабочих органов дорожно-строительных и почвообрабатывающих машин. – М.: Эко-Пресс, 2013. – 328 с.
- 50 Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологий: руков. для инженеров. – СПб., 2013. – 406 с.
- 51 Коротков В.А., Пегашкин В.Ф. Плазменная закалка корпусов оборудования // Молодежь и наука: матер. междунар. науч.-практ. конф. старшекласс., студ. и аспирантов. – Нижний Тагил, 2023. – С. 82-84.
- 52 Сафонов Е.Н. Плазменная закалка деталей машин: монография. – Нижний Тагил, 2014. – 116 с.
- 53 Нагимов Р.Ш., Вафин Р.К. Исследование влияния температуры и продолжительности ионного азотирования в дуговом разряде на механические характеристики поверхности после комплексной ионно-плазменной обработки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2024. – №4. – С. 111-117.
- 54 Bayati M.R., Molaei R., Janghorban K. Surface alloying of carbon steels from electrolytic plasma // Met Sci Heat Treat. – 2011. – Vol. 53. – P. 91-94.
- 55 Kusmanov S.A., Smirnov A.A., Silkin S.A. et al. Modification of Low-Alloy Steel Surface by Plasma Electrolytic Nitriding // J. of Materi Eng and Perform. – 2016. – Vol. 25, Issue 7. – P. 2576-2582.
- 56 Комбаев К. и др. Структурно-фазовое преобразование модели плашки с электролитно-плазменным упрочнением и повышением износостойкости // Вестник ВКТУ им. Д. Серикбаева. – 2023. – №3. – С. 70-80.
- 57 Комбаев К. Электролитно-плазменная обработка поверхности конструкционно-легированной стали 42ХМФА (аналог AISI 4140), применяемой для изготовления коленчатых валов двигателей КАМАЗ-740 // Вестник ВКТУ. – 2022. – №3. – С. 75-85.
- 58 Сулюбаева Л.Г., Байжан Д.Р., Алибекова Б.А. Способ термоциклической электролитно-плазменной обработки для улучшения микротвёрдости поверхности конструкционной стали 40ХН // Қ.А. Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университетінің хабарлары. – 2024. – №4(31). – С. 37-46.
- 59 Горбатков М.В., Парфенов Е.В., Жернаков С.В. и др. Функциональная модель процесса электролитно-плазменной обработки как объекта управления // Вестник УГАТУ. – 2014. – Т. 18, №3(64). – С. 181-188.
- 60 Рахадиллов Б.К. и др. Влияние электролитно-плазменного упрочнения поверхности на структуру и свойства стали 40ХН // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. – 2020. – №1. – С. 199-204.
- 61 Кусманов С.А., Крит Б.Л., Кусманова И.А. и др. Технологические приёмы и оборудование плазменно-электролитной обработки металлов и сплавов // Электронная обработка материалов. – 2024. – №60(5). – С. 54-80.

62 Королёв А.Ю., Алексеев Ю.Г., Нисс В.С. и др. Электролитно-плазменная обработка в управляемых импульсных режимах // Наука и техника. – 2021. – Т. 20, №4. – С. 279-286.

63 Погребняк А.В., Понарядов В.В., Рузимов Ш.М. и др. Закалка и легирование стали в результате электролитно-плазменной обработки // Взаимодействие излучений с твердым телом: матер. 5-й междунар. науч. конф. – Минск, 2003. – С. 76-78.

64 Семчук Г.И., Дудников А.А. Анализ способов повышение долговечности культиваторных лап // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 5, №1(65). – С. 67-71.

65 Safonov E.N. Structure and hardness of cast iron after surface hardening // Metal Science and Heat Treatment. – 2005. – Vol. 47, Issue 9-10. – P. 434-439.

66 Balanovsky A.E., Shtayger M.G., Grechneva M.V. et al. Comparative metallographic analysis of the structure of St3 steel after being exposed to different ways of work-hardening // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 411. – P. 012012.

67 Kanaev A.T., Sarsembaeva T.E., Gulyarenko A.A. Modernization of the surface layer structure of heavily loaded parts of tillage machines with plasma hardening // Steel in Translation. – 2022. – Vol. 52, Issue 3. – P. 363-368.

68 Канаев А.Т., Тополянский П.А., Гуляренко А.А. и др. Плазменная закалка сменных деталей рабочих органов почворежущих машин // Вестник науки Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина. – 2018. – №1(96). – С. 152-157.

69 Балановский А.Е., Ву В.Г. К вопросу определения пятна нагрева при плазменной поверхностной обработке // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): матер. 6-й всерос. науч.-технич. конф. с междунар. участ. – Иркутск, 2016. – С. 113-122.

70 Злоказов М.В., Коротков В.А. Влияние силы тока при ручной плазменной закалке на глубину и твердость упрочненного слоя штампового инструмента // Сварочное производство. – 2016. – №9. – С. 39-42.

71 Белинин Д.С., Верхорубов В.С., Кучев П.С. и др. Плазменная закалка тяжелонагруженных деталей из стали 40X13 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2011. – №3. – С. 12-18.

72 Martynov V., Brzhozovsky B., Zinina E. et al. Fluctuations in the process plant as a quality assessment criterion of low-temperature plasma hardening process // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 176. – P. 451-460.

73 Гуляренко А.А., Редреев Г.В. Актуальность и результаты исследования по плазменному упрочнению рабочих органов сельскохозяйственных машин // Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития: матер. 7-й междунар. науч.-практ. конф. – Омск, 2022. – С. 182-192.

74 Петухов А.В. Повышение эксплуатационных свойств деталей машин и инструмента поверхностным легированием из плазмы: автореф. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Иркутск, 1990. – 36 с.

- 75 Шекуров А.В., Коротков В.А. Влияние полярности дуги на глубину и твердость слоя плазменной закалки стали 40 // Сварочное производство. – 2008. – №7. – С. 32-34.
- 76 Хамин О.Н., Кадымов Ш.А. Сравнительный анализ методов поверхностного упрочнения коррозионно-стойких сталей аустенитного класса // Современные материалы, техника и технологии. – 2020. – №5(32). – С. 120-128.
- 77 Великоцкий Р.Е., Лащина С.В. Влияние химического состава на механические свойства стали ОХСНД // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2004. – №4(41). – С. 90-94.
- 78 Макеев Д.Н. Влияние вводимых легирующих элементов на свойства стали // Вестник СГТУ. – 2012. – Т. 3, №1(67). – С. 92-98.
- 79 Abdollah-Zadeh A., Jafari-Pirlari A., Barzegari M. Tempered martensite embrittlement in a 32NiCrMoV125 steel // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2005. – Vol. 14, Issue 5. – P. 569-573.
- 80 Pu P., Chen T. Nanostructured metals with an excellent synergy of strength and ductility // Materials (Basel). – 2022. – Vol. 15, Issue 19. – P. 6617.
- 81 Rakhadilov B., Satbaeva Z., Kozhanova R. et al. Effect of the structure formed after bulk and surface hardening on the hardness and wear resistance of 20Cr2Ni4A steel // Eurasian Physical Technical Journal. – 2022. – Vol. 19, Issue 1(39). – P. 20-25.
- 82 Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М., 2007. – 397 с.
- 83 Горецкий Г.П., Соловей Н.Ф., Шенец С.Л. и др. Структура и характеристика борсодержащих сталей для крепежа // Литье и металлургия. – 2020. – №1. – С. 25-30.
- 84 Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. – М., 1991. – 3183 с.
- 85 Технология конструкционных материалов / под ред. М.С. Корытов. – Изд. 2-е, перер. и доп. – М.: Юрайт, 2020. – 234 с.
- 86 Ivanytskyj Y.L., Lenkovskiy T.M., Molkov Y.V. et al. Influence of 65G steel microstructure on crack faces friction factor under mode II fatigue fracture // Archives of Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 82, Issue 2. – P. 49-56.
- 87 Jedamski R. et al. Non-Destructive Micromagnetic Determination of Hardness and Case Hardening Depth Using Linear Regression Analysis and Artificial Neural Networks // Materials. – 2020. – Vol. 11, Issue 1. – P. 18.
- 88 Орешко Е.И. и др. Методы измерения твёрдости материалов (обзоров) // Тр. ВИАМ. – 2020. – №1(85). – С. 101-117.
- 89 Ефремов Л.В., Тикалов А.В. Алгоритмы оценки линейной и объемной (весовой) интенсивности изнашивания материалов на машине трения // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Т. 63, №4. – С. 293-301.
- 90 Перепелкина С.Ю., Коваленко П.П., Печенко Р.В. и др. Методика исследования трибологических характеристик материалов на машине трения // Известия вузов. Приборостроение. – 2016. – Т.59, №8. – С. 636-640.
- 91 Петрова Н.Д., Сыромятникова А.С., Иванов А.М. Прочность, ударная вязкость и механизм разрушения термопластически обработанной

низколегированной стали при 213 К // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17, №2-4. – С. 863-867.

92 Сатаров А. Ускоренный метод определения склонности нержавеющей стали к межкристаллитной коррозии // Матер. междунар. практ. интер.-конф. «Актуальные проблемы науки». – Алматы, 2019. – Вып. 2. – С. 137-140.

93 Старикова Е.Ю., Зуев М.В., Ягин В.С. Исследование коррозионной агрессивности почв // Химия и химическая технология: достижения и перспективы: матер. 6-й всерос. конф. – Кемерово, 2022. – С. 616.1-616.5.

94 Толеуова А.Р., Косанова И.М., Канаев А.Т. және т.б. Плазмалық шынықтыру арқылы конструкциялық болаттың беттік құрылымын жақсарту // Тр. универ. – 2022. – №1(86). – Б. 46-52.

95 Канаев А.Т., Молдахметова А.Е., Косанова И.М. и др. Структурообразование в плазменно-упрочненных конструкционных сталях: монография. – Астана, 2023. – 209 с.

96 Нгуен В.Ч. Повышение твердости поверхностного слоя малоуглеродистой стали за счет плазменной обработки модифицирующей обмазки // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24, №1(150). – С. 52-63.

97 Пугачёва Н.А., Николин Ю.В., Быкова Т.В. и др. Химический состав, структура и микротвёрдость многослойных высокотемпературных покрытий // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, №4. – С. 138-150.

98 Канаев А.Т., Тополянский П.А., Гуляренко А.А. и др. Исследование влияния плазменного упрочнения на характеристики рабочих поверхностей плужных лемехов и лап культиваторов // Сварочное производство. – 2022. – №9. – С. 38-45.

99 Коротков В.А. Поверхностная плазменная закалка. – Нижний Тагил, 2012. – 64 с.

100 Коротков В.А. Исследования плазменной закалки в Нижнетагильском филиале Уральского федерального университета // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2015. – №10(667). – С. 64-70.

101 Kanaev A.T., Bogomolov A.V. Formation of a Gradient-Layered Structure during Thermal Deformation Treatment of Reinforced Steel // Steel in Translation. – 2020. – Vol. 50, Issue 7. – P. 509-513.

102 Дрожжин А. Плазменно-порошковая наплавка в ООО «Барнаульский котельный завод» // Вестник арматуростроителя. – 2020. – №1(57). – С. 14-17.

103 Бирюков В.П. и др. Лазерное упрочнение и наплавка деталей машин // <https://ritm-magazine.com/en/node/1932?ysclid=mp7abbkwc0483880>. 10.10.2025.

104 Багайсков Ю.С., Рябцев А.С. Обзор методов упрочнения деталей из стали 45 для повышения их стойкости // <https://web.snauka.ru/issues/>. 10.10.2025.

105 Волков С. Закалка стали: основные методы, технологии и секреты процесса // <https://metalloprokat.com/page/news>. 10.10.2025..

106 Хачкинаян А.Е., Фисенко К.С. Исследование износостойкости упрочнённого наплавленного металлопокрытия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – №12. – С. 245-248.

- 107 Коптелов А.Ю., Мартынов С.В. Современные технологии поверхностного упрочнения деталей машин: плазменная закалка // Вестник МГТУ Станкин. – 2021. – №3(63). – С. 45-51.
- 108 Коротков В.А. Технология ручной плазменной закалки // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова. – 2014. – №5(27). – С. 53-59.
- 109 Зубко Д. А. Рациональное применение плазменной закалки // Сварка. Реновация. Триботехника: матер. 9-й Уральс. науч.-практ. конф. – Екатеринбург, 2019. – С. 139-144.
- 110 Балановский А.Е. Плетников И.А. Комплексная оценка качества технологии плазменного поверхностного упрочнения бандажей локомотивов. Ч. 1 // Сварка и диагностика. – 2012. – №3. – С. 45-50.
- 111 Ismail M.I.S., Taha Z. Surface Hardening of Tool Steel by Plasma Arc with Multiple Passes // International Journal of Technology. – 2014. – Vol. 5, Issue 1. – P. 79-87.
- 112 Косанова И.М. Анализ оптимальных режимов плазменной обработки стали 65Г // Матер. 83-й междунар. науч.-практ. конф. «Научный форум: технические и физико-математические науки». – М., 2025. – С. 38-43.
- 113 Kanaev A., Bogomolov A., Kossanova I. et al. Plasma hardening of heavily loaded parts of soil-cutting machines // Journal Metalurgija. – 2023. – Vol. 62, Issue 2. – P. 289-292.
- 114 Stryczewska H.D. et al. Effect of Plasma Gas Type on the Operation Characteristics of Arc Plasmatrons // Energies. – 2024. – Vol. 17, Issue 11. – P. 2696.
- 115 Белинин Д.С., Щицын Ю.Д. Плазменная поверхностная термообработка высоколегированных сталей током обратной полярности // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №2. – С. 78-85.
- 116 Belinin D.S., Neulybin S.D., Kuchev P.S. et al. Combined plasma hardening options to current straight polarity // Master's Journal. – 2012. – Issue 2. – P. 23-29.
- 117 Коротков В.А. Плазменная закалка контактных поверхностей массивных изделий // Судостроение. – 2014. – №5(816). – С. 30-33.
- 118 Плетников И.А., Балановский А.Е., Сорокин А.А. Исследование температурных режимов плазменной закалки деталей сельскохозяйственного назначения // Вестник машиностроения. – 2014. – №6. – С. 58-62.
- 119 Kossanova I.M., Kanayev A.T., Akhmedyanov A.U. et al. Improving the surface structure of massive parts by the plasma method // Herald of science of S. Seifullin Kazakh agrotechnical university. – 2020. – Vol. 107, Issue 4. – P. 167-176.
- 120 Коротков В.А., Баскаков Л.Б., Толстов И.А. Восстановление и упрочнение роликов рольгангов // Сварочное производство. – 1991. – №3. – С. 31-33.
- 121 Kanayev A.A., Kossanova I.M., Sarsembayeva T.E. et al. Assessing the durability of heavy-duty parts of soil-cutting machines with the size optimization and structure modification // Steel in translation. – 2024. – Vol. 54, Issue 8. – P. 733-741.
- 122 Зверев Е.А., Скиба В.Ю., Вахрушев Н.В. и др. Оценка уровня остаточных напряжений в плазменных покрытиях // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – №5-3(59). – С. 42-47.

123 Пат. №8917 РК. Способ определения внутренних остаточных напряжений / Канаев А.Т., Косанова И.М., Канаев А.А. и др.; опубл.07.03.24.

124 Лещинский Л.К., Самотугин С.С., Пирч И.И. и др. Плазменное поверхностное упрочнение. – Киев: Техника, 1990. – 109 с.

125 Гречнева М.В. Анализ результатов работ в области плазменного поверхностного упрочнения сталей и сплавов в РФ // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – №1(53). – С. 48-58.

126 Канаев А.Т., Гуляренко А.А., Тополянский П.А. и др. Плазменная закалка Лемеха плуга из конструкционной стали // Горение и плазмохимия. – 2020. – Т. 18, №2. – С. 87-93.

127 Martynov V., Brzhozovsky B., Zinina E. et al. Fluctuations in the Process Plant as a Quality Assessment Criterion of Low-temperature Plasma Hardening Process // Proceed. of the 3rd internat.l conf. on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM 2016). – Samara, 2017. – P. 451-460.

128 Растегаев И.А., Коротков В.А., Афанасьев М.А. и др. Влияние плазменной закалки на износостойкость стали 65Г // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83, №5. – С. 62-65.

129 Скаков М.К., Курбанбеков Ш.Р. Повышение механических свойств и коррозионностойкости нержавеющей стали с помощью плазменной обработки // Матер. 5-й конф. «Современные методы в теоретической и экспериментальной электрохимии». – Плес, 2013. – С. 126.

130 Косанова И.М., Канаев А.Т., Толкынбаев Т.А. и др. Исследование изменения структуры, показателей твердости и трещиностойкости плазменно-упрочненной стали 65Г // Известия высших учебных заведений. Черная Metallургия. – 2023. – Т. 66, №5. – С. 516-521.

131 Коротков В.А., Злоказов М.В. Исследование износостойкости углеродистых сталей, упрочненных плазменной закалкой // Трение и износ. – 2014. – Т. 35, №2. – С. 178-182.

132 Коротков В.А., Злоказов М.В. Исследование износостойкости штамповых сталей, прошедших упрочнение плазменной закалкой // Вестник машиностроения. – 2014. – №8. – С. 59-61.

133 Суплецов В.С. Анализ количественных характеристик износа металлических конструкций зданий обогатительных фабрик алмазодобывающей промышленности // Вестник ВСГУТУ. – 2022. – №3(86). – С. 75-82.

134 Синеоков Г.Н., Панов И.М. Теория и расчёт почвообрабатывающих машин. – М., 1987. – 328 с.

135 Гапич Д.С., Моторин В.А., Олейников Р.Н. Износ лемехов, изготовленных по линейной технологии // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. – 2021. – №1(61). – С. 317-326.

136 Косанова И.М., Канаев А.Т., Джаксымбетова М.А. и др. Оценка износостойкости почворезущих деталей МТА при натурных испытаниях // Матер. 12-й междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения». – Астана, 2024. – С. 341-343.

137 Крагельский И.В. Трение и износ. – Изд. 2-е, перер. и доп. – М., 1968. – 481 с.

- 138 Погребняк А.Д., Тюрин Ю.Н., Ивченко А.П. и др. Влияние электролитной плазменной обработки на физико-механические свойства сталей // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2003. – Т. 25, №10. – С. 1329-1338.
- 139 Муравьев К.А. Методики оценки трещиностойкости конструкционных сталей // *Приволжский научный вестник*. – 2012. – №3(7). – С. 18-27.
- 140 Аверин С.И., Алымов М.И. Оценка разрушающего давления газонаполненных пор с трещинами // *Перспективные материалы*. – 2024. – №8. С. 84-88.
- 141 Косанова И.М. Анализ изменения величины ударной вязкости стали 65Г до и после плазменного упрочнения при испытаниях на ударный изгиб // *Матер. 95-й междунар. науч.-практ. конф. «Технические науки: проблемы и решения»*. – М., 2025. – С. 19-24.
- 142 Спиридонова К.В., Литовченко И.Ю., Полехина Н.А. и др. Ударная вязкость и особенности разрушения 12% хромистой ферритно-мартенситной стали ЭП-823 в температурном интервале от –196 до 100°C // *Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия*. – 2024. – №67(6). – С. 716-724.
- 143 Litovchenko I., Almaeva K., Polekhina N. et al. The microstructure and mechanical properties of ferritic-martensitic steel EP-823 after high-temperature thermomechanical treatment // *Metals*. – 2022. – Vol. 12, Issue 1. – P. 79.
- 144 Веремейчик А.И., Нерода М.В., Холодарь Б.Г. и др. Испытания на изгиб образцов из стали 40Х13 после лазерной закалки и легирования // *Перспективные направления инновационного развития и подготовки кадров*. – 2024. – №2, ч. 1. – С. 17-23.
- 145 Дмитриев И.Ю., Молочников Д.Е. Качественные и количественные показатели коррозионного разрушения // *Наука и образование*. – 2022. – Т. 5, №2. – С. 123-128.
- 146 Осербаетова А.К., Нуруллаев Ш.П., Кодиров Х.К. Защита стали от коррозии в кислых и нейтральных средах // *Universum: химия и биология*. – 2018. – №11(53). – С. 48-52.
- 147 Амирханова Н.А., Валиев Р.З., Разяпова А.Ф. и др. Исследование коррозионного поведения и высокоскоростного растворения сталей СТ43, СТ45 и 12Х18Н10Т в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях // *Вестник УГАТУ*. – 2008. – Т. 10, №1. – С. 91-95.
- 148 Мансуров О.П., Авалбоев Г.А., Рузматов И. и др. Коррозия углеродистой стали в 30- процентном растворе аммиачной селитры // *Молодой ученый*. – 2015. – №5. – С. 47-50.
- 149 Aghuy A.A. et al. Effect of grain size on pitting corrosion of 304L austenitic stainless steel // *Corrosion Science*. – 2015. – Vol. 94. – P. 368-376.
- 150 Косанова И.М., Рамазанова Ж.М., Канаев А.Т. и др. Оценка коррозионной стойкости стали 65Г до и после плазменной закалки // *Металлург*. – 2025. – №6. – С. 27-30.
- 151 Патрушов А.Е. Оценка технико-экономической эффективности пирометаллургической технологии переработки пылей электросталеплавильного производства // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2020. – Т. 24, №3. – С. 672-683.

152 Абызова Е.В. Рощупкин Е.Ю. Факторы финансовой устойчивости предприятия // Проблемы экономики и менедж. – 2016. – №5(57). – С. 133-135.

153 Борисов А.А., Чернат И.С. Совершенствование оценки экономической эффективности освоения инновационных проектов // Научно-технические ведомости СПбГУ. – 2020. – Т. 13, №5. – С. 145-156.

154 Голант Е.А., Крылов С.И. Значение анализа финансового состояния организации и факторы, влияющие на ее финансовую устойчивость // Устойчивое развитие российских регионов: экономическая политика в условиях внешних и внутренних шоков: сб. Матер. 12-й междунар. науч.-практ. конф. – Екатеринбург, 2017. – С. 225-239.

155 Гусева Е.А. Пильникова И.Ф. Анализ финансового состояния организации // Молодежь и наука. – 2016. – №5. – С. 181.

156 Игнатьева Е.В. Методика анализа финансового состояния предприятия // Молодой ученый. – 2017. – №5. – С. 272-275.

157 Самуэльсон П., Нордхаус У. Экономика / пер. с англ. – М.: Вильямс, 2014. – 1360 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Рекомендации к внедрению результатов работы



«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ТОО «НУР 777 КАС»
Кайрбеков А.С.
«13» 05 2026 г.



«УТВЕРЖДАЮ»
Член Правления – Проректор
по исследовательской деятельности
НАО «Казахский агротехнический
исследовательский
университет им. С. Сейфуллина»
Абдрахманов С.К.
«26» 05 2026 г.

Рекомендации к внедрению

результатов научно-исследовательской работы

«Улучшение качества поверхностного слоя тяжело-нагруженных деталей методом
плазменной обработки»

Комиссия в составе: директора ТОО «НУР 777 КАС» Кайрбекова А.С., техника Тажибаева Н.Н., с одной стороны и представителей НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С.Сейфуллина» докторанта Косановой И.М., научного консультанта д.т.н., профессора Канаева А.Т., с другой стороны составили настоящую рекомендацию о внедрении научно-исследовательской работы «Улучшение качества поверхностного слоя тяжело-нагруженных деталей методом плазменной обработки».

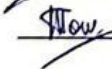
В процессе внедрения выполнены следующие работы:

1. Проведены полевые испытания по износостойкости деталей.
2. Разработана и внедрена методика оптимального режима плазменной обработки.
3. Рассчитана износостойкость по потере контролируемых параметров и по потере массы деталей.
4. Выполнена оценка производственной эффективности применения плазменной обработки.

Предложение о дальнейшем внедрении работы и замечания:

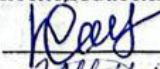
Рекомендуется дальнейшее применение технологии плазменной закалки для упрочнения тяжело-нагруженных деталей сельскохозяйственных машин.

Представители Предприятия:

 Кайрбеков А.С.
 Тажибаев Н.Н.

Представители

исследовательской группы

 Канаев А.Т.
 Косанова И.М.



РАСЧЕТ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА от применения технологии плазменной закалки лемехов плуга и лап культиватора

Эксплуатационные исследования проводились с расчетом на 1000 гектаров пашни. Капитальные вложения в приобретение и внедрение установки плазменной закалки составили 8000000 тенге. Установка рассчитана на эксплуатацию в течение 10 лет, при этом среднегодовая производственная загрузка составляет 10 000 гектаров. За весь срок службы установка способна обеспечить упрочнение деталей, предназначенных для обработки 100 000 гектаров пашни. В ходе исследований сравнивались эксплуатационные и экономические показатели применения традиционных деталей (без закалки) и деталей, подвергнутых плазменной закалке. В качестве базовых были выбраны наиболее изнашиваемые рабочие органы почвообрабатывающих машин – лемехи плуга и лапы культиватора.

Производственно-экономическая эффективность определялась по следующим критериям: снижение общего количества закупаемых запасных частей за счёт увеличения ресурса; уменьшение трудозатрат на замену комплектующих; сокращение расходов на обслуживание и логистику; снижение процента преждевременных отказов деталей; снижение совокупных затрат на единицу обработанной площади.

Исходные данные для экономических расчётов

Параметр	Обозначение	Значение	
		Лемехи плуга	Лапы культиватора
Затраты на детали без закалки (1 000 га)	Z_1	1 456 000 тг	1 120 000 тг
Затраты на детали с плазм. закалкой (1 000 га, включая энергию)	Z_2	1 024 000 тг	736 000 тг
Доля годовой амортизации оборудования (8 000 000 тг / 5 лет)	A_e	1 600 000 тг/год	
Нагрузка на одно хозяйство (1 000 га из 10 000 га общей)	k	0.1	

Дополнительные амортиз. затраты на хозяйство	$A = A_c \cdot k$	60 000 тг /год
Капитало затраты в установку плазменной заковки	K	8 000 000 тг

Сводная таблица расчётных показателей (на 1000 га):

Показатель	Лемех плуга (без заковки)	Лемех плуга (с заковкой)	Лапа культиватора (без заковки)	Лапа культиватора (с заковкой)
Расход на 1000 га, цт	9,6	8	19,2	16
Средний ресурс до предельного износа, га	720	870	740	900
Трудоемкость монтажа/замены, чел.ч (0,25 ч/лемех; 0,2 ч/лапа)	2,4	2,0	3,84	3,2
Средний преждевременного выхода из строя, %	7,1 %	5 %	5,7 %	4 %
Себестоимость 1 детали, тг	9100	12800	3500	4600
Общие затраты на закупку, тг	146286	102400	105143	73600
Затраты на обслуживание, тг	3429	2400	5486	3840
Экономия по закупке и обслуживанию, тг	44915		33189	

Годовые затраты на детали с плазменной заковкой (с учётом энергии и труда) составили 1 024 000 ~~тг~~ (лемехи плуга) и 736 000 (лапы культиватора) соответственно. Средний ресурс деталей до предельного износа увеличился в 1,25 раз; также наблюдается снижение объёма закупок и процент преждевременных отказов на 29%.

Плазменная заковка при оптимальных режимах повышает показатели твердости и коррозионной стойкости ~~почвообрабатывающих~~ деталей в агрессивных средах, снижает абразивный износ, тем самым увеличивая ресурс деталей.

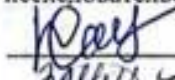
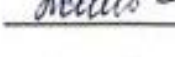
Таким образом, применение технологии плазменной заковки позволяет достичь выраженного экономического эффекта при эксплуатации сельскохозяйственной техники, особенно на крупных площадях в аграрном секторе в рамках программ повышения производительности и снижения затрат.

Представители Предприятия:

 Кайырбеков А.С.
 Тажибаев Н.Н.

Представители

исследовательской группы

 Канаев А.Т.
 Косанова И.М.

« 27 / 04 2026 г.



исследовательский
университет им. С. Сейфуллина
Абдрахманов С.К.
«26» _____ 2026 г.



Рекомендации к внедрению результатов

докторской диссертационной работы Косановой И.М. «Улучшение качества поверхностного слоя тяжело-нагруженных деталей методом плазменной обработки»

Настоящей рекомендацией подтверждаем, что результаты работы, выполненных на предприятии АО «Qarmet» в лаборатории Металловедения и дефектоскопии, приняты к внедрению и реализации.

Разработанные методика и режим плазменной обработки стали марки 65Г позволяет повысить механические, прочностные и эксплуатационные свойства, а также стойкость к абразивному износу материалов благодаря изменению структуры поверхности металла и образованию поверхностного слоя.

Выявленные закономерности формирования мелкозернистой структуры плазменно-обработанных материалов, позволяют значительно повысить прочностные характеристики свойств на уровне, удовлетворяющем требованиям стандартов.

Выявлено, что значительно повышается твердость, износостойкость, коррозионная стойкость тяжело-нагруженных материалов, также увеличивается толщина закаленного слоя.

Предложенные технологии позволяют получать высокопрочные и качественные материалы с мелкодисперсной структурой и низкой интенсивностью изнашивания.

Методика плазменной обработки принята для дальнейшего внедрения в условиях АО «Qarmet».

Начальник лаборатории
металловедения и дефектоскопии
ЦАК СТК АО «Qarmet»



Григоруккина Елена Николаевна

Патент на полезную модель



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Технологическая инструкция

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

ТОО «МехТехСервис»

Чеховский Н.А.

2026 г.



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНСТРУКЦИЯ

Плазменная закалка лемехов плугов

Разработан: Косановой И.М.

Астана, 2026

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Стандарт организации

СТО ТОО 190740006823-01-2026

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ ТОО «МехТехСервис»

УДК 621.791.75:621.78:669.14:631.312(083.74)
КП ВЭД 25.61

МКС 25.200

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор
ТОО «МехТехСервис»
Чеховский Н.А.
«27» 04 2026 г.


ПЛАЗМЕННАЯ ЗАКАЛКА ИЗДЕЛИЙ ИЗ УГЛЕРОДИСТЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

СТО ТОО 190740006823-01-2026
(введен впервые)

Срок действия
с «27» 04 2026 г.
до «27» 04 2031 г.

Держатель подлинника:
ТОО «МехТехСервис»
г.Кокшетау ул.Ауельбекова, д.179

Разработан
Косановой И.М.

г.Астана

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Соглашение о научном сотрудничестве

ДОГОВОР О СОТРУДНИЧЕСТВЕ

между

**НАО «Казахский агротехнический университет им. С.Сейфуллина»
(Республика Казахстан)**

и

**ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»
(Российская Федерация)**

НАО «Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина», в лице Председателя Правления **Куришбаева Ахылбека Кажигуловича**, действующего на основании Устава, с одной стороны, и ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», в лице Ректора университета **Сараева Павла Викторовича**, действующего на основании Устава, с другой стороны, совместно именуемые «Стороны», а по отдельности «Сторона», для того чтобы установить прямое и взаимовыгодное сотрудничество в области высшего образования, науки и культуры и повысить эффективность учебной, методологической и научно-исследовательской работы, заключили настоящий Договор о сотрудничестве (далее – «Договор»), о нижеследующем:

Статья 1

Целью настоящего Договора является сотрудничество между университетами в области научно-исследовательской и образовательной деятельности, а также обмена профессорско-преподавательским составом и студентами.

Статья 2

Для реализации цели настоящего Договора Стороны согласуются сотрудничать друг с другом по следующим направлениям:

- академический обмен обучающимися по программам бакалавриата, магистратуры, PhD докторантуры, преподавателями и исследователями для прохождения обучения, краткосрочных и долгосрочных стажировок, профессиональных (учебно-производственных, производственных, исследовательских, преддипломных, педагогических) практик;
- сотрудничество в подготовке высококвалифицированных научно-педагогических кадров и специалистов в областях, представляющих взаимный интерес;
- сотрудничество в области подготовки совместных образовательных программ двойных дипломов на уровне бакалавриата и магистратуры, результатом которого будет выдача дипломов Сторон;
- приглашение представителей Сторон для чтения лекций, обмена опытом и информацией по учебно-методической работе, а также учебными планами и программами;

5 (1103)

- проведение лекций, мастер-классов (в режиме «онлайн» в том числе) профессорско-преподавательским и административным составом Сторон;
- проведение совместных научных и научно-технических исследований привлечением профессорского состава для со-руководства и научной консультации в написании магистерских и докторских диссертаций;
- проведение совместных конференций, семинаров, симпозиумов, круглых столов, дней, посвященных Сторонам, и других мероприятий и инициатив в области образования и науки. Результатом таких совместных мероприятий являются, в том числе, публикации в рецензируемых научных изданиях, входящих в ведущие мировые базы данных научного цитирования, в том числе WebofScience, Scopus и др.;
- создание и публикация совместных научных и учебных трудов по результатам выполнения совместных работ;
- обмен публикациями, научными исследованиями, учебно-методической литературой, периодическими изданиями, информацией о проводимых мероприятиях;
- стороны должны проводить обязательный инструктаж по технике безопасности с каждым новоприбывшим обучающимся и ППС;

Статья 3

Условия реализации мероприятий, определенных в Статье 2, будут изложены в отдельных соглашениях Сторон.

Статья 4

Условия финансирования для реализации проектов в рамках настоящего Договора определяются отдельными соглашениями Сторон.

Стороны считают возможным привлечение потенциальных финансовых партнеров, включая фонды.

Статья 5

Настоящий Договор может быть изменен и дополнен по взаимному согласию Сторон путем подписания дополнительных соглашений, которые будут являться его неотъемлемой частью и должны быть надлежащим образом оформлены и подписаны уполномоченными лицами Сторон.

Статья 6

Сотрудничая в рамках настоящего Договора, Стороны будут придерживаться законов и правил участвующих стран.

Споры, возникающие в процессе исполнения Договора, будут разрешаться путем обсуждений и переговоров между Сторонами.

Статья 7

Настоящий Договор вступает в силу с момента подписания Сторонами и действует в течение 5 (пяти) лет. Настоящий Договор автоматически пролонгируется на последующие 5 (пять) лет, если ни одна из Сторон не выскажется за прекращение действия Договора не позднее, чем за 6 (шесть) месяцев до его окончания.

Статья 8

Настоящий Договор составлен в двух экземплярах на русском языке.

НАО «Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина»

010000, г. Нур-Султан,
проспект Женис, 62
Республика Казахстан
тел.: (7-7172) 317547
E-mail: agun.katu@gmail.com,
www.kazatu.kz

Подпись: _____
Председатель Правления, профессор
Куришбаев А.К.



Дата: 18/02/2020

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

398055, г. Липецк,
ул.Московская, 30
Российская Федерация
тел.: +7 (4742) 328-000
E-mail: mailbox@stu.lipetsk.ru
www.stu.lipetsk.ru

Подпись: _____
Ректор университета, доцент
Сараев П.В.



Дата: 15/03/2020

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Справка

«Л.Н. ГУМИЛЕВ атындағы
ЕУРАЗИЯ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы



«L.N. GUMILYOV
EURASIAN NATIONAL UNIVERSITY»
non-profit joint-stock company

Қазақстан Республикасы,
010008, Астана қ., Қ. Сәтбаев к., 2
тел.: +7 (7172) 70-95-00, факс: +7 (7172) 70-94-57
e-mail: enu@enu.kz
www.enu.kz

Republic of Kazakhstan,
010008, Astana, 2 Satbayev Str.
tel.: +7 (7172) 70-95-00, fax: +7 (7172) 70-94-57
e-mail: enu@enu.kz
www.enu.kz

28 05 05-10-06/-3810
« » 2026 ж. №

(нөмір және кіріс құжат күшіне сілтеме)

Талап етілген жерге

АНЫҚТАМА

«Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КЕАҚ 2022-2024 жылдарға арналған гранттық қаржыландыруға арналған 2022 жылғы «18» қазандағы №192/30-22-24 Шарт аясындағы **AP14869891 «Теміржол көлігінің ауыр жүктемелі бөлшектерінің пайдалану ресурсын инновациялық плазмалық технологияны қолдану арқылы арттыру»** (ғылыми жетекші – Канаев А.Т.), 2025-2027 жылдарға арналған гранттық қаржыландыруға арналған 2025 жылғы «06» қазандағы №380/25-27 ГФ Шарт аясындағы асырылып жатқан **AP26104483 «Исследование и разработка градиентного упрочнения цельнокатаных железнодорожных колес плазменной закалкой»** (ғылыми жетекші - Канаев А.Т.) ғылыми жобалар бойынша **Косанова Индира** 2022 жылдан бастап қазіргі уақытқа дейін кіші ғылыми қызметкері болып табылатынын растайды.

Басқарма мүшесі - Ғылым және
коммерцияландыру
жөніндегі проректордың м.а

А. Талтенов

Орын.: Конкаева С.А.
Тел.: 709 500, ішкі 31 219



Біздің сериалдық нөміріміз жарамсыз болып табылады. Жауап қайтарғандарға міндетті түрде бұл № және күні көрсетілген керек.



Құжат туралы мәліметтер / Сведения о документе

Құжат түрі / Тип документа	Шығыс құжаты / Исходящий документ			
Құжат нөмірі және күні / Номер и дата документа	№05-10-06/-3810 28.05.2026 ж. / №05-10-06/-3810 28.05.2026 г.			
Жіберуші мекеме / Отправитель организация	«Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КЕ АҚ / НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева»			
Қабылдаушы / Получатель	/ справка по месту требования			
Құжатқа сілтеме / Ссылка на документ	http://directum.enu.kz/Sungero?type=d1d2a452-7732-4ba8-b199-0a4dc78898ac&id=661266			
Келісу парағы / Лист согласования				
Нәтиже / Результат	ТАӘ / ФИО	Лауазымы / Должность	Қол қою уақыты / Время подписи	ЭЦП
Келісілді / Согласовано	Молдахметов а Алия Ерлановна	Басқарма бастығы / Начальник управления	2026-05-26 ж./г.16:48	
Келісілді / Согласовано	Регистратор1 исходящих документов	Маман / Специалист	2026-05-28 ж./г.11:58	
Қол қойылды / Подписано	Талтенов Абзал Ахатович	Ректордың кеңесшісі / Советник ректора	2026-05-28 ж./г.12:00	