На правах рукописи

Луканин Борис Евгеньевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РЕСУРСА ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

Специальность 4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук



Москва 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), Мытищинский филиал

Научный руководитель: **Голубев Михаил Иванович**
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технологии и оборудования лесопромышленного производства Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Борулько Вячеслав Григорьевич**
доктор технических наук, доцент,
и. о. заведующего кафедрой техносферной безопасности Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева»

Кретинин Виктор Иванович
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры автоматизации, метрологии и управления в технических системах ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования **«Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова»**

Защита диссертации состоится «25» декабря 2026 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.331.10 в Мытищинском филиале Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана по адресу: 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1, ауд. 1222.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1 и на сайте http://mf.bmstu.ru.

Автореферат разослан: «___» _____2026 г.

и.о. ученого секретаря диссертационного совета,
д.т.н., профессор Сиротов А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Ключевая проблема при обеспечении долговечности лемехов — это необходимость совмещения взаимоисключающих свойств: высокой поверхностной твёрдости для сопротивления абразивному изнашиванию и достаточной вязкости, прочности сердцевины для восприятия ударных нагрузок. Традиционные лемеха, изготовленные из средне- или высокоуглеродистых сталей и подвергнутые объёмной закалке с последующим отпуском, часто представляют собой компромисс между этими характеристиками и не всегда обеспечивают требуемый ресурс в тяжёлых условиях эксплуатации.

В связи с этим исследования, направленные на повышение эксплуатационного ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин, в частности лемеха лесного плуга при помощи лазерного упрочнения, как метода повышения твёрдости и износостойкости деталей рабочих органов являются актуальными и перспективными и имеют важное хозяйственное значение.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в решение вопросов продления срока службы и повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин внесли отечественные и зарубежные исследователи: Аулов В.Ф., Борулько В.Г., Винокуров В.Н., Драпалюк М.В., Ерохин М.Н., Канаев А.Т., Козарез И.В., Кретинин В.И., Курчаткин В.В., Лялякин В.П., Посметьев В.И., Сидоров С.А., Соловьёв С.А., Тельнов Н.Ф., Черноиванов В.И. и др.

Однако, несмотря на обширный объем научных работ, посвященных улучшению износостойкости, комплексное обеспечение долговечности рабочих органов в условиях интенсивного абразивного износа остается областью, где многие аспекты требуют дальнейшего глубокого изучения и решения. Применяемые сегодня методы упрочнения, восстановления и защиты поверхностей, включая плазменную наплавку, CVD-покрытия, электроискровую обработку и фрикционное легирование, демонстрируют значительные успехи в отдельных направлениях. Однако их применение ограничено, поскольку они не всегда способны обеспечить оптимальный баланс между прочностью, ударной вязкостью и сопротивле-

нием износу для рабочих органов лесохозяйственных машин, используемых при почвообработке.

Цель работы – повысить эксплуатационный ресурс лемеха для отвальной вспашки поверхностным термоупрочнением с использованием специализированного комплекса на базе иттербиевого волоконного лазера.

Задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели:

- провести сравнительный анализ конструкционных особенностей, из номенклатуры используемых в лесном и сельском хозяйстве лемехов, а также материалов для их изготовления и выбрать лемеха и марку стали для исследований;

- выполнить сравнительный анализ различных методов термического упрочнения стали 65Г, исследовать структурные композиции, формирующиеся в поверхностном слое при термическом упрочнении металлографическими методами, для выявления наиболее эффективного способа термоупрочнения;

- исследовать степень воздействия параметров лазерной обработки на фазовый состав, микроструктуру и физико-механические свойства исследуемой стали и их влияние на глубину проникновения в металл и изменение микротвёрдости поверхностного слоя упрочняемых деталей, определить оптимальные параметры лазерной термообработки для достижения требуемых свойств материала лемеха;

- установить зависимости эксплуатационного ресурса лемеха и износостойкости материала от способов упрочнения;

- провести проверку результатов исследований в полевых условиях и составить технологическую карту для последующего использования технологии в производственных условиях, провести оценку соответствия (сертификацию) технологического процесса нормативным требованиям и дать экономическую оценку разработанной технологии.

Научная новизна:

1. Экспериментально доказана зависимость значений прочностных характеристик зон термического упрочнения рабочих кромок плужных лемехов из стали 65Г от режимов работы волоконного лазера при поверхностной лазерной термообработке и выявлены закономерности этого влияния.

2. Экспериментально установлены оптимальные параметры лазерного термоупрочнения плужных лемехов из стали 65Г, обеспечивающие увеличение твёрдости обработанного слоя и повышение стойкости к абразивному износу.

3. Установлены зависимости эксплуатационного ресурса плужного лемеха от способов его упрочнения. Выявлено влияние напряженного состояния, возникающего в стали 65Г после термического упрочнения, на ресурс рабочих органов лесохозяйственных машин, предназначенных для обработки почвы.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Установлены оптимальные технологические параметры лазерного термоупрочнения низколегированной высокоуглеродистой стали 65Г, обеспечивающие увеличение микротвердости и износостойкости поверхностного слоя в 1,5-2,7 раза.

2. Предложена методика, позволяющая подобрать режим лазерного термоупрочнения лемеха лесного плуга из стали 65Г для получения требуемой микротвердости и глубины упрочненного поверхностного слоя.

3. Создана и сертифицирована технология лазерного термоупрочнения высокоуглеродистых сталей, что подтверждается сертификатом № 015-ОС.2.00018 на технологический процесс "Лазерное термоупрочнение высокоуглеродистых сталей".

4. Результаты исследований внедрены в разработку стандарта организации общества с ограниченной ответственностью «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «ИРЭ-ПОЛЮС» №18003536-044-2024 «Лазерное термоупрочнение высокоуглеродистых сталей. Технологический процесс».

5. По результатам исследований разработана технологическая инструкция ТИ 16-102025 для использования на предприятиях, осуществляющих производство, ремонт и восстановление почвообрабатывающей техники, в том числе для лесного хозяйства.

6. Результаты натурных испытаний лесных плугов с лемехами, упрочненными предложенным способом, подтверждены актами, выданными ГКУ КО

«Медынское лесничество» и «Учебно-опытным лесхозом МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Методология и методы исследований. В работе применялись современные научно-экспериментальные методы исследования процессов объёмной закалки и лазерной термообработки. Для сбора и анализа данных использовался математический аппарат статистической обработки. Теоретическое моделирование опиралось на современные достижения в машиностроении, материаловедении, математическом моделировании, теории теплопроводности и термических напряжений.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Зависимости эксплуатационного ресурса лемеха от способов его упрочнения.

2. Оптимальные технологические параметры лазерного термоупрочнения низколегированной высокоуглеродистой стали 65Г, обеспечивающие увеличение микротвердости и износостойкости поверхностного слоя.

3. Методика, позволяющая подобрать режим лазерного термоупрочнения лемеха лесного плуга из стали 65Г для получения требуемой микротвердости и глубины упрочненного поверхностного слоя.

4. Технология лазерного упрочнения лемехов лесных плугов, позволяющая увеличить их эксплуатационный ресурс в 1,5-2,7 раза

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов подтверждается корректным использованием общих положений фундаментальных наук, проверена по известным критериям изучаемых процессов, достаточным количеством экспериментальных данных, использованием современного поверенного и откалиброванного измерительного оборудования, сопоставлением полученных результатов с результатами других авторов. Основные результаты исследований докладывались на ежегодной национальной научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана по итогам научно-исследовательских работ за 2021, 2022, 2023, 2024, 2025 гг., Мытищи; XVIII меж-

дународной научно-практической конференции «Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК», р.п. Правдинский Московской обл., 04 июня 2026 г.

Публикации. В рамках диссертационного исследования опубликовано 9 научных работ, из них 5 статей в журналах из списка ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы, 4 приложения. Диссертация изложена на 163 странице, содержит 35 таблиц, 79 рисунков. Список использованной литературы содержит 141 источник.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, представлены основные научные положения, выносимые на защиту, и практическая значимость работы.

В первой главе на основе литературных данных проведён обзор наиболее часто применяемых при лесовосстановлении лемехов для отвальной вспашки, материалов используемых для производства лемехов и технологий для их упрочнения. Проведён сравнительный анализ современных методов термоупрочнения лемехов. Изучены конструктивные особенности лазеров с различными активными веществами накачки. Обоснован выбор волоконного лазера для проведения термоупрочнения. Рассмотрены конструктивные особенности лазерного технологического оборудования, применяемого для реализации термоупрочнения. В качестве объекта исследований выбран трапециевидный лемех лесного плуга ПКЛ-70А для отвальной вспашки, в качестве материала для проведения исследований рассматривается сталь 65Г. Проанализированы и структурированы основные причины уменьшения эксплуатационного ресурса лемеха. Обосновано применение экспериментального оборудования на основе волоконных лазеров для осуществления лазерного термоупрочнения, с указанием его конструктивных особенно-

стей. В результате анализа литературных источников сформулированы задачи исследований.

Во второй главе на основе диаграммы состояния системы железо-углерод рассмотрены особенности формирования микроструктуры стали 65Г при различных способах термообработки и их влияния на эксплуатационные свойства конструкционных сталей.

Подтверждено, что после объёмной закалки стали 65Г с последующим среднетемпературным отпуском формируется типичная для доэвтектоидных сталей микроструктура троостита отпуска, гарантированно обеспечивающая заданные эксплуатационные свойства (высокое сопротивление малой пластической деформации, стабильность релаксационной стойкости и др.), что соответствует общепринятым представлениям о традиционной термической обработке аналогичных сталей.

Термический цикл плазменной закалки: сверхбыстрый нагрев и охлаждение (~ 103 - 105 К/с), а также короткий временной отрезок воздействия на образец (10^{-2} – 10^{-3} с) способствуют заметному измельчению микроструктуры обрабатываемого материала с образованием наноструктурированных компонентов субзёрен, что способствует формированию микроструктуры с высокой твёрдостью.

Экстремальные значения параметров термического воздействия на металл при лазерном термоупрочнении без оплавления, схожи с параметрами нормализации или высокотемпературного отпуска и обеспечивают образование строго регламентированного упрочнённого слоя. Это обусловлено мгновенным отводом тепла от разогретой поверхности в тело заготовки. Кроме того, практическая ценность лазерного термоупрочнения состоит в том, что оно является финишной операцией, не требующей последующей механической обработки.

Результаты изучения и анализа особенностей формирования микроструктуры стали 65Г при исследуемых способах термообработки, определяющих комплекс эксплуатационных свойств деталей и изделий, свидетельствуют о преимуществах лазерной термической обработки (закалки) без расплавления поверх-

ности. Основой таких преимуществ стала возможность контролировать тепловложение при соблюдении требуемых термических циклов нагрева и охлаждения, обеспечивающих получение заданного (проектного) сочетания прочностных и вязкопластических характеристик деталей и изделий продукции машиностроительного производства.

В третьей главе приведено описание материалов, оборудования и методик исследования. Определён состав оборудования и разработана методика изготовления образцов для проведения сравнительного анализа технологий объёмной закалки и поверхностного лазерного термоупрочнения. Установлены режимы перемещения лазерного луча, при использовании метода поверхностного лазерного упрочнения (Рисунок 1).

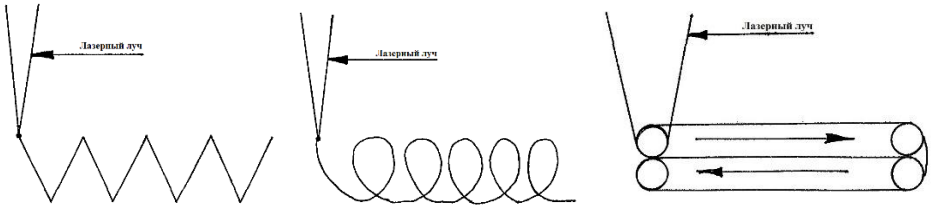


Рисунок 1. Режимы перемещения лазерного луча: линейный, круговой, «круглое пятно»

Сконструирована опытная лазерная установка на основе серийно выпускаемого непрерывного иттербиевого волоконного лазера ЛС-5 и оптической лазерной головки IPG FLW D30W с модулем колебаний луча позволяющей задавать различные траектории движения лазерного луча, что позволило получить на поверхности образцов пятна разной геометрической формы с равномерным распределением мощности в зоне лазерной обработки.

Применена уникальная методика, разработанная специалистами ООО НТО «ИРЭ-Полюс» для вычисления характеристик оптической системы лазерных головок, учитывающая геометрические параметры её компонентов (Рисунок 2).

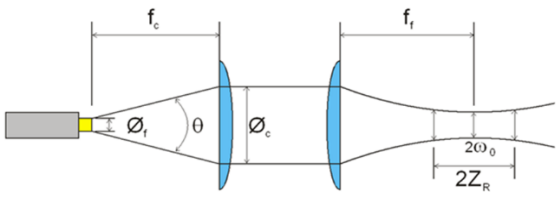


Рисунок 2. Оптическая схема лазерной головки IPG FLW D30W

На основании геометрических данных компонентов, указанных на Рисунке 3, произвели расчёт размера пятна лазерного излучения ($2\omega_0$) и измерили диаметр перетяжки, после прохождения оптической системы с заданными параметрами. Расчёт основных параметров сфокусированных лазерных пятен провели по следующим формулам:

$$BPP = \frac{\emptyset_f}{2}\frac{\theta}{2} = \frac{M^2\lambda}{\pi}, \quad (1)$$

$$2\omega_0 = \frac{f_f}{f_c}\emptyset_f, \quad (2)$$

$$M^2 = \frac{BPP}{BPP_0}, \quad (3)$$

$$BPP_0 = \frac{\lambda}{\pi}, \quad (4)$$

$$\emptyset_c = f_c\theta, \quad (5)$$

$$2\omega_0 = \frac{f_f}{f_c}\emptyset_f, \quad (6)$$

где *BPP* (beam parameter product) - параметр качества пучка, мм/рад; f_c - фокусное расстояние коллиматора, мм, f_f - фокусное расстояние фокусирующей линзы, мм $\emptyset_f$ - диаметр транспортного волокна, мкм; $\emptyset_a$ - диаметр активного волновода, мкм; λ - длина волны, мкм, $\emptyset_c$ - размер пятна на коллиматоре, мкм; M^2 - отношение угла расходимости лазерного пучка (θ, рад) к углу расходимости «эталонного» гауссова пучка ($\emptyset_g$, рад); 2ω0 - размер пятна в фокусе, мкм; z_R - рэлеевская длина, мм. Величину $2z_R$ называют глубиной фокуса лазерного пучка.

Для оценки остаточного эксплуатационного ресурса плужного лемеха использовали метод измерения коэрцитивной силы, представляющий собой эффективный, простой и надёжный способ неразрушающего контроля.

Адаптирована методика стандарта США ASTM G-65-83 для проведения испытаний на устойчивость упрочнённых образцов к абразивному износу применительно к настоящему исследованию. Выбрана и применена теоретическая модель, описывающая процесс лазерной закалки. С помощью программы Simufact Welding 6.00 рассчитаны градиенты температур и возможная структура материа-

ла, после лазерного термоупрочнения. Разработана методика проведения сравнительных полевых испытаний для лемехов, упрочнённых разными способами закалки.

В четвёртой главе приведены результаты экспериментальных исследований, проведённых в рамках диссертационной работы.

Установлено, что при выборе режимов лазерного упрочнения исследуемых образцов вполне допустимо ориентироваться на технологические параметры, реализующие типичный процесс традиционной объёмной закалки: нагрев до 840 ° (15-20 мин), охлаждение в воде или в масле, с среднетемпературным отпуском (нагрев до 400 °, охлаждение на воздухе).

Металлографические исследования показали, что после упрочнения методом объёмного нагрева и последующего среднетемпературного отпуска образцы, имеющие изначально типичную перлитно-ферритную структуру доэвтектоидой стали и средней исходной твёрдостью (микротвёрдостью) 196HV, приобрели мелкодисперсную структуру игольчатого мартенсита (охлаждение в воде, твёрдость 530 HV) и структуру троостита отпуска с отдельными включениями сорбита (охлаждение в масле, твёрдость 350 HV) (Рисунок 3).

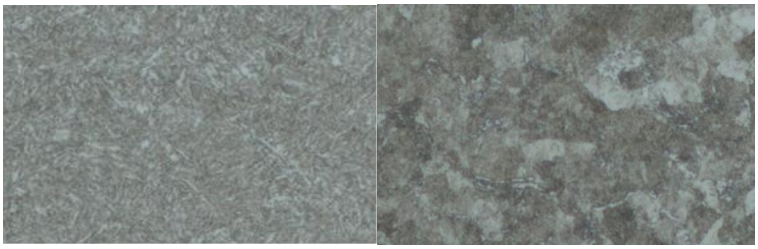


Рисунок 3. Микроструктура образцов после закалки в воде (левое фото) и в масле (правое фото) (увеличение×500)

Выяснили, что при лазерном термоупрочнении стали 65Г, параметры обработки следует подбирать таким образом, чтобы плотность мощности лазерного излучения в зоне воздействия была близка к критической величине 0,06-0,07 кВт/мм². При этом скорость перемещения лазера составила 10 мм/с, средняя мощность лазера варьировалась в диапазоне 1-2,25 кВт, а диаметр лазерного пятна на поверхности стали находился в пределах 5-10 мм. Микроструктура зоны закалки образцов после лазерной обработки состоит из мелкозернистого мартенсита и

остаточного аустенита, возникших при охлаждении из гомогенного аустенита (Рисунок 4). Как видно из рисунков 3 и 4, микроструктура стали 65Г после лазерной закалки схожа по составу со структурой, полученной в результате объёмного нагрева и закалки в воде (мелкодисперсный игольчатый мартенсит).

Определено, что при обработке линейным режимом движения лазерного луча, одиночными проходами со скоростью 10 мм/с и амплитудой колебания луча 10 мм (мощность излучения 2,25 кВт) на поверхности отмечено наличие трёх зон: закалки (мелкозернистый мартенсит и остаточный аустенит) при глубине слоя 612 - 630 мкм с твёрдостью 900 - 1000 HV; отпуска (троостит и /или сорбит) и основного металла, где структура осталась перлитно-ферритной, потому что термическое влияние минимально и не происходит никаких превращений (Рисунок 5)

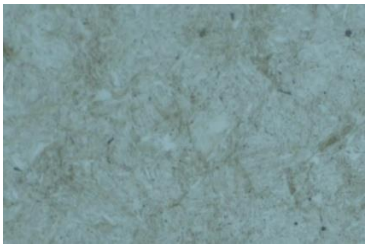


Рисунок 4. Микроструктура зоны закалки (увеличение×500)

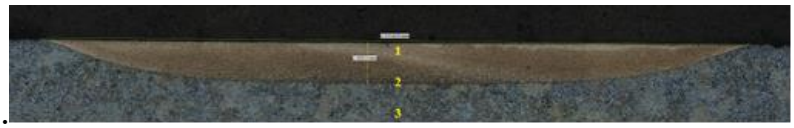


Рисунок 5. Зона термического влияния при линейном режиме обработки (увеличение×50)

Изучено, влияние оптических режимов сканирования лазерного луча при термической обработке на характеристики упрочненного поверхностного слоя стали 65Г. Показано, что после обработки образцов режимом с линейным перемещением лазерного луча, твердость конструкционной стали марки 65Г выросла в 4,5 раза с 196 HV у необработанного образца до 935 HV у образца, обработанного линейным режимом и в 1,7 раза по сравнению с образцами упрочнёнными объёмным нагревом с закалкой в воду. Интенсивность линейного изнашивания упрочненных образцов оказалась в 2,7 раза ниже, чем у необработанных, и в 2 раза ниже, чем у образцов, прошедших объемную закалку в воду (Таблица 1).

Таблица 1

Результаты измерений абразивного износа и микротвёрдости

№ образца	Способ упрочнения	Твёрдость, HV30	Масса до начала работ, гр	Масса после окончания работ, гр	Потеря массы, гр
1.	Объёмная закалка в воду	535	7197,7	7189,6	8,1
2.	Объёмная закалка в воду	542	7194,5	7186,4	8,1
3.	Объёмная закалка в масло	356	7221,9	7214,8	7,1
4.	Линейный режим лазерного упрочнения	895	7199,1	7194,3	4,8
5.	Линейный режим лазерного упрочнения	935	7201,3	7196,6	4,7
6.	Без термической обработки	196	7191,8	7176,0	15,8

Установлена принципиальная возможность контролировать механические свойства и напряжённое состояние образцов из стали 65Г после их термообработки, при помощи измерения коэрцитивной силы, учитывая прямую зависимость величины значений коэрцитивной силы Нс от твердости стали и уровня остаточных напряжений.

В результате расчетно-экспериментального исследования получены зависимости картины фазового состава от температуры металла по глубине зон лазерной обработки, определяющего комплекс служебных свойств, а также эксплуатационный ресурс деталей и изделий машиностроения.

Доказано, что лемеха, упрочнённые разработанной лазерной технологией, в 1,7 раза эффективнее сопротивляются абразивному износу в реальных полевых условиях, чем лемеха, упрочнённые традиционным методом объёмной закалки и в 3,3 раза эффективнее серийных изделий. (Рисунок 6).



Рисунок 6. Потеря массы лемехом, г

Результаты полевых испытаний однозначно подтверждают эффективность разработанной технологии упрочнения как с точки зрения физических свойств, так и с экономической выгоды. Минимальный износ лемехов, упрочненных лазером, является измеримым показателем превосходства, обеспечивающим ощутимую экономию для лесных хозяйств благодаря сокращению затрат на запасные части и ремонтные работы.

В пятой главе представлены способы повышения эксплуатационного ресурса плужного лемеха из стали 65Г. Выявлено, что термическая обработка лемехов для повышения их износостойкости является эффективным способом увеличения эксплуатационного ресурса рабочих органов лесохозяйственных машин, что делает её одной из самых востребованных технологических операций. Показано, что повышение показателя твердости стали 65Г приводит к росту износостойкости изделий, изготовленных из неё, что, в свою очередь, приводит к увеличению эксплуатационного ресурса лемеха. Проведены исследования зависимости эксплуатационного ресурса лемеха от износостойкости. Рассчитан остаточный эксплуатационный ресурс плужного лемеха при помощи измерений величины коэрцитивной силы Нс.

Путем сравнительного анализа полученных расчетных данных был оценен ресурс образцов после термической обработки. Остаточный ресурс (R) рассчитывался по формуле с использованием полученных экспериментальных данных:

$$R = \left(\frac{\text{Нс крит} - \text{Нс то}}{\text{Нс крит} - \text{Нс исх}}\right) \times 100\%, \quad (7)$$

где: R – остаточный ресурс образца, %;

$Нс_{крит}$ - критическое значение коэрцитивной силы в момент разрушения образца, А/см;

$Нс_{то}$ – значение коэрцитивной силы образца в покое, после термической обработки, А/см;

$Нс_{исх}$ – значение коэрцитивной силы образца до термообработки, в состоянии поставки, А/см.

Практические примеры расчёта остаточного ресурса образцов, упрочнённых термической обработкой:

объёмная закалка в воде: R ((12,5 - 11,9)/ (12,5 – 7,6)) × 100% = (0,6/4,9) × 100% = 12,2%;

лазерное упрочнение круговым режимом: R ((12,5 – 8,8)/ (12,5 – 7,6)) × 100% = (3,7/4,9) × 100% = 75,5%.

Сравнительный анализ остаточного ресурса образцов после термической обработки выявил существенную разницу. Объемная закалка обеспечивает в среднем 23,4% ресурса, в то время как лазерная закалка увеличивает его до 71,4%, что примерно в три раза больше.

В шестой главе приведены технико-экономическое обоснование увеличения эксплуатационного ресурса лемеха.

Показано, что переход на упрочнённые лазером лемеха обеспечивает лесохозяйственным предприятиям не только прямую экономию на замене деталей, но и целый комплекс системных, долгосрочных преимуществ. Эти выгоды охватывают весь производственный цикл, улучшая качество обработки почвы, повышая надёжность оборудования, снижая износ плуга и улучшая условия труда механизаторов.

Доказано, что внедрение упрочнённых лемехов выходит за рамки обычной замены компонента; это полноценная трансформация всего подхода к почвообработке. Положительный эффект от такого шага носит накопительный характер: выгоды со временем суммируются и многократно усиливаются. Для крупных предприятий это особенно актуально, поскольку даже минимальные улучшения в отдельных показателях, умноженные на масштаб производства, обеспечивают существенный экономический и технологический прорыв.

Расчёт себестоимости упрочнения одного лемеха лазером в сравнении с другими способами закалки показал, что лазерное термоупрочнение является конкурентоспособным в области ценообразования, в сравнении с традиционными и распространёнными на данный момент способами упрочнения, обладая при этом рядом неоспоримых преимуществ.

Анализ технико-экономической эффективности технологии лазерного термоупрочнения выявил годовой экономический эффект в 203012 рублей для хозяйства с находящимися в эксплуатации 25 плугами. Это достигается за счет снижения расходов на запчасти, логистику и сокращения трудозатрат на обслуживание техники.

Заключение:

1 Анализ показал, что в лесном хозяйстве при обработке почвы наряду с долотообразными лемехами активно используются трапецевидные лемеха П 702, производимые из углеродистых сталей (45, Л53, 65Г). Однако, несмотря на их распространенность, серийное производство сталкивается с проблемой низкой прочности и ограниченной долговечности, что снижает их эксплуатационный ресурс.

2. Исследование методов улучшения износостойкости лемехов лесных плугов показало, что наиболее распространенными и изученными являются традиционные методы, такие как объемная закалка, электродуговая наплавка, закалка ТВЧ и плазменное упрочнение. Лазерное термоупрочнение, напротив, является перспективным, но пока недостаточно изученным подходом. Выполнен сравнительный анализ фазового состава и микроструктуры зон, возникающих в области термического воздействия лазерного луча в образцах из конструкционной стали марки 65Г и микроструктуры и фазового состава образцов из той же стали упрочнённых методом объёмного нагрева с охлаждением в воду или масло с последующим среднетемпературным отпуском.

3. Исследовано, как различные способы сканирования лазерным лучом влияют на свойства упрочненного поверхностного слоя стали 65Г. Экспериментально установлены закономерности изменения микротвердости (HV) в зависимости от глубины и ширины упрочненного слоя. Анализ структуры до и после лазерной обработки показал, что она приводит к образованию твердого модифицированного слоя. Металлографический анализ подтвердил трансформацию исходной перлитно-ферритной структуры в смесь мелкозернистого мартенсита и остаточного аустенита, что и обеспечивает повышенную твердость и прочность.

4. Проведено исследование влияния оптических режимов сканирования лазерного луча при термической обработке на характеристики упрочненного поверхностного слоя стали 65Г. Показано, что после обработки образцов режимом с линейным перемещением лазерного луча, твердость конструкционной стали марки 65Г выросла в 4,5 раза с 196 HV у необработанного образца до 935 HV у образца, обработанного линейным режимом и в 1,7 раза по сравнению с образцами упрочнёнными объёмным нагревом с закалкой в воду. Интенсивность линейного изнашивания упрочненных образцов оказалась в 2,7 раза ниже, чем у необработанных, и в 2 раза ниже, чем у образцов, прошедших объемную закалку в воду.

5. Исследования, проведенные в полевых условиях, продемонстрировали, что лемеха лесного плуга ПКЛ-70А, обработанные методом лазерной закалки, обладают эксплуатационным ресурсом, превосходящим втрое ресурс образцов, закаленных традиционным объемным способом. Данное преимущество сохраняется вне зависимости от конкретных параметров лазерной обработки. После прохождения полевых испытаний получены акты испытаний, утверждённые эксплуатирующими организациями и разработана технологическая инструкция процесса лазерного термоупрочнения трапецеидального лемеха из стали 65Г для внедрения на ремонтных и производственных предприятиях. Проведена оценка соответствия (сертификация) технологического процесса нормативным требованиям.

6. Проведён расчёт себестоимости упрочнения лемеха лазерным лучом в сравнении с другими методами упрочнения. Исследование технико-экономической эффективности технологии показало, что она обеспечивает ежегодную экономию в размере 203 012 рублей для хозяйства, располагающего 25 плугами. Данный эффект достигается благодаря оптимизации затрат на запасные части, логистику и сокращению трудозатрат на техническое обслуживание.

Публикации автора по теме диссертации

Публикации в научных изданиях из перечня ВАК РФ:

1. Луканин Б.Е., Голубев М.И., Преимущества технологии лазерного термоупрочнения лемеха лесного плуга из стали 65Г // Системы. Методы. Технологии. 2024. №3 (63). С. 145-151. (0,44 п.л./0,33 п.л.). Лично соискателем разработана ме-

тодика и проведены сравнительные исследования эффективности различных способов термоупрочнения стальных образцов.

2. Луканин Б.Е., Особенности выбора режимов лазерной термообработки плужного лемеха из стали 65Г // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 250. С. 288-302. (0,9 п.л.).

3. Оценка рабочего ресурса стали 65Г после термоупрочнения по величине коэрцитивной силы / В.В. Быков, М.И. Голубев, Б.Е. Луканин [и др.] // Техника и оборудование для села. 2025. №2 (332). С. 34-38. (0,38 п.л./0,2 п.л.). Лично соискателем проведены экспериментальные исследования коэрцитивной силы для оценки величины остаточных напряжений термоупрочненных стальных образцов.

4. Бирюков В.П., Криворотов В.И., Луканин Б.Е., Оценка свойств образцов из стали 65Г после лазерного и традиционных методов упрочнения применительно к эксплуатации сельскохозяйственных и лесотехнических машин // Фотоника. 2025. Т. 18. №7. С. 550-562. (0,8 п.л./0,5 п.л.). Лично соискателем разработана технология и определены режимы лазерного термоупрочнения и выполнен расчет прогнозируемого эксплуатационного ресурса деталей по результатам измерения значений коэрцитивной силы.

5. Применение метода коэрцитиметрии для оценки остаточных напряжений в плоских ножах, упрочненных ТВЧ-борированием / В.П. Лялякин, В.И. Криворотов, Б.Е. Луканин [и др.] // Технический сервис машин. 2023. Т. 61. №1 (150). С. 93-102. (0,63 п.л./0,3 п.л.). Лично соискателем получены экспериментальные данные для построения тарировочных кривых, используемых для определения остаточных напряжений

Прочие публикации:

6. Оценка эксплуатационного ресурса лемеха с учетом внутренних напряжений на основе расчетно-экспериментального подхода с измерением коэрцитивной силы / В. В. Быков, М. И. Голубев, Б. Е. Луканин [и др.] // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК (ИнформАгро-2026) : материалы XVIII Международной научно-практической интернет-конференции, р.п. Правдинский, 4 июня 2026 г. – ФГБНУ Росинформагротех,

2026. – С. 511–518. (0,5 п.л./0,35 п.л.). Лично соискателем проведены исследования влияния вида и режимов термической обработки на микротвердость, остаточные напряжения и величину коэрцитивной силы для оценки эксплуатационного ресурса.

7. Увеличение эксплуатационного ресурса лесного плуга ПКЛ-70А лазерным упрочнением лемеха / В. В. Быков, М. И. Голубев, Б. Е. Луканин [и др.] // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции. – Саратов: ФГБОУ ВО Вавиловский университет, 2026. – С. 125–128. (0,25 п.л./0,15 п.л.). Лично соискателем проведены экспериментальные исследования методов термической обработки и выполнен расчет прогнозируемого эксплуатационного ресурса термоупрочненных образцов.

8. Луканин Б.Е. Разработка технологических основ лазерного термоупрочнения и возможность прогнозирования остаточного ресурса рабочих органов лесохозяйственных машин // Ежегодная национальная (с международным участием) научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана по итогам научно-исследовательских работ за 2022 г. : материалы конференции. – Мытищи: Научно-инновационный центр, 2023. С. 64-65. (0,13 п.л.).

9. Луканин Б.Е. Разработка технологических основ лазерного термоупрочнения рабочих органов лесохозяйственных машин // Ежегодная национальная научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана по итогам научно-исследовательских работ за 2021 г. : материалы конференции». – Красноярск: ООО «Научно-инновационный центр», 2022. С. 68-69. (0,13 п.л.).