

На правах рукописи

ВЕТРОВА СОФЬЯ МИХАЙЛОВНА

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ
ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ
СОСТАВА СТАЛЕЙ И РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена на кафедре материаловедения и технологии машиностроения
ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА
имени К. А. Тимирязева»

Научный руководитель: **Гайдар Сергей Михайлович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой материаловедения и
технологии машиностроения ФГБОУ ВО
«Российский государственный аграрный
университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

Официальные оппоненты: **Величко Сергей Анатольевич**
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры технического сервиса ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет им. Н. П. Огарёва»

Титов Николай Владимирович
кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой надежности и ремонта машин ФГБОУ
ВО «Орловский государственный аграрный
университет им. Н. В. Парахина»

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Брянский государственный
аграрный университет»

Защита состоится 19 сентября 2024 года в 13.00 часов на заседании
диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский
государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», по
адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел/факс: 8 (499) 976-17-14.

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

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

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 35.2.030.03,
кандидат технических наук, доцент _____ Н. Н. Пуляев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Почвообработка при производстве сельскохозяйственной продукции является основным звеном технологического процесса. Она изменяет качество и структуру почвы, обеспечивает насыщение почвы кислородом, обеспечивает жизнедеятельность микробиологических процессов, равномерно распределяет удобрения, способствует уничтожению сорняков и вредителей, а также накоплению и удержанию влаги в почве.

Рабочие органы почвообрабатывающих машин при использовании по назначению и хранении подвергаются интенсивному износу под воздействием климатических и эксплуатационных факторов.

Именно состав, агрегатные состояния и физико-механические свойства почвы определяют ее изнашивающую способность. Степень абразивности зависит главным образом от гранулометрического состава и изменяется в зависимости от вида почвы. Наличие каменистых включений вызывает разрушение рабочих органов. Присутствие в почве влаги, а также коррозионно-агрессивных химических элементов в результате применения агрохимии вызывает электрохимическую коррозию и, как следствие, приводит к коррозионно-механическому износу рабочих органов.

Разрабатываемые конструкционные параметры рабочих органов не удовлетворяют современным требованиям, так как скорость обработки почвы значительно увеличивается с каждым годом, при возрастании массы сельскохозяйственных машин. Повышение массы СХТ повышает уплотняемость почв, нагрузки на рабочие органы пахотных агрегатов в результате возросли примерно в 4 раза, хотя сами рабочие органы не изменились.

До настоящего времени проблемы работоспособности рабочих органов для почвообрабатывающих машин решались зарубежными поставками продукции зарубежных фирм. По этой причине предприятиями металлургии и машиностроения в РФ, новым материалам и технологиям производства продукции для АПК не уделялось должного внимания. Поэтому разработка инновационной технологии упрочнения низколегированных сталей будет способствовать повышению срока службы рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Степень разработанности темы. Вопросами износа рабочих органов занимались ряд авторов: Бернштейн Д.Б., Винокуров В.М., Виноградов В.Н., Гайдар С.М., Голубев И.Г., Ерохин М.Н., Крагельский И.В., Костецкий Б.И., Львов П.Н., Михальченков А.М., Ниловский И.Л., Огрызков Е.П., Панов И.М., Пронин А.Ф., Рабинович А.Ш., Розенбаум А.Н., Севернев М.М., Сидоров С.А., Синеоков Г.Н., Тененбаум М.М., Хрущов М.М. и многие другие ученые.

Анализ литературного обзора показал, что не все вопросы, связанные с повышением износостойкости рабочих органов, получили должное решение. Вследствие отсутствия новых материалов и технологий производства рабочих органов для почвообрабатывающих машин, которые позволят повысить срок эксплуатации по сравнению с изделиями, представленными сегодня на рынке, и решить острую проблему импортозамещения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ. Программа Мегагранта, соглашение № 075-15-2021-572 по теме: Перспективные высокопрочные стали с высокой пластичностью и ударной вязкостью для землеройной и сельскохозяйственной техники.

Цель работы. Повышение износо- и коррозионностойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин за счет оптимизации химического состава сталей и режимов термической обработки низколегированных сталей.

Объект исследования. Процесс изнашивания рабочих органов почвообрабатывающих машин при воздействии климатических и эксплуатационных факторов.

Предмет исследования. Влияние химического состава сталей и термической обработки на механические свойства.

Методология и методы исследований. Исследования базируются на основе всестороннего анализа изучаемой проблемы, постановке цели и задач исследований, статистической обработке экспериментальных данных и анализе полученных результатов.

Научная новизна работы. Получение комплекса высоких механических свойств путем оптимизации состава низколегированных сталей и технологии термической обработки: закалка-распределение.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Химический состав новых высокопрочных низколегированных сталей с условным пределом текучести 1500...1700 МПа, пределом прочности 1700...2100 МПа и ударной вязкостью до 60...74 Дж/см².

2. Технологические режимы традиционной и перспективной термической обработки – закалка-распределение для изготовления рабочих органов почвообрабатывающих машин.

3. Результаты испытаний на износо- и коррозионную стойкость рабочих органов, проведенных в лабораторных и натуральных (полевых) условиях.

4. Технология изготовления лап культиватора из разработанной низколегированной стали.

Практическая ценность:

- разработан новый химический состав сталей, обеспечивающий высокие механические свойства и изготовлены образцы;

- оптимизирован технологический режим термической обработки сталей, позволяющий получить одновременно высокую прочность и ударную вязкость;

- изготовлены образцы рабочих органов из среднеуглеродистых низколегированных сталей, и проведены лабораторные и натурные испытания в полевых условиях на полях ФГБНУ ФИЦ Картофеля имени А. Г. Лорха.

Достоверность полученных результатов. Теоретические исследования выполнены с использованием физико-математических законов, основ трибологии, термодинамики и надежности машин. Эксперименты проводились с применением современных методик и ГОСТов на современном оборудовании. Результаты подтверждены лабораторными, стендовыми, полевыми испытаниями. Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась с использованием математической статистики.

Апробация работы. Результаты теоретических и экспериментальных исследований представлены, обсуждены и одобрены на научных конференциях, совещаниях, семинарах, в том числе: XIV Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения А.П. Семенова «Трибология – машиностроению», Москва, 2022; Международной конференции «Физическая мезомеханика материалов. Физические принципы формирования многоуровневой структуры и механизмы нелинейного поведения», Новосибирск, 2022; Международная научная конференция «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения», посвящённая 85-летию Института машиноведения им А.А. Благонравова РАН, Москва 2023; Международной научно-технической конференции молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности», Могилев, 2023; Международной конференции «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии», Томск, 2023; Семинар Чтения академика В.Н. Болтинского, Москва, 2023; XXII Международной научно-практической конференции. «Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции - новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства», Тамбов, 2023; Всероссийской научно-практической конференции с международным участием и Всероссийской Школы молодых учёных «Актуальные проблемы развития научных исследований и инноваций в сельскохозяйственном производстве», Белгород, 2023; Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы современных технологий производства и переработки сельскохозяйственной продукции», Курск, 2023; Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева «Инновационная техника и технологии в АПК», Москва, 2023; VIII Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов и аспирантов, Москва, 2023; Участник II этапа Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых аграрных образовательных и научных организаций России в 2023 году по номинации «Машины и оборудование для АПК», Белгород, 2023; Участник III этапа Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых аграрных образовательных и научных организаций России в 2023 году по номинации «Машины и оборудование для АПК», Уфа, 2023; Семинар «Чтения академика В.Н. Болтинского», посвященный 300-летию Российской академии наук, Москва 2024; 2-я Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров «Технологии, машины и оборудование для проектирования, строительства объектов АПК», Курск, 2024; Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Молодежь. Наука. Инновации», Ярославль, 2024.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 статья в журнале, рецензируемом международной базой данных Scopus, 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 173 страницах, состоит из введения, основной части содержащей 29 таблиц и 78 рисунков, заключения, принятых сокращений, списка литературы, включающей 114 наименований, в том числе 33 на иностранном языке и 4 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, дана ее общая характеристика, сформулированы: цель исследования, объект и предмет исследования, изложена научная новизна, практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса повышения долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин» представлен анализ основных видов изнашивания, приводящих к изменению размеров и форм почвообрабатывающих органов, вследствие чего нарушается их работоспособность. Рассмотрены материалы, применяемые для изготовления рабочих органов почвообрабатывающих машин отечественных и зарубежных производителей, а также методы повышения износостойкости материалов рабочих органов почвообрабатывающих машин. На основании результатов анализа литературных источников были сформулированы следующие задачи исследования:

1. Разработать новую рецептуру стали, обеспечивающую повышение ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин;
2. Оптимизировать режимы, упрочняющей термической обработки для изготовления листового проката и плоских деталей рабочих органов;
3. Изготовить опытную партию листового проката;
4. Провести лабораторные и стендовые исследования физико-механических свойств полученной стали;
5. Разработать технологию упрочнения рабочих органов методом приварки, а также закрепления на наиболее изнашиваемые участки износостойких пластин;
6. Оценить износостойкость и работоспособность рабочих органов, изготовленных из разработанной, стали в полевых условиях в супесчаной почве;
7. Определить технико-экономическую эффективность внедрения результатов исследования в производство.

Во второй главе «Оценка влияния химического состава и технологии термообработки на эксплуатационные характеристики сталей» рассмотрен процесс изнашивания рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов при перемещении их в почве, который представлен, как воздействие на почву клина с плоской или криволинейной поверхностью (рисунок 1). При этом происходит уплотнение, скалывание, а затем перемещение почвы по его рабочей поверхности.

Давление, оказываемое почвой на клин, зависит от характера деформации, параметров клина, скорости перемещения, физико- механических свойств и состояния почвы.

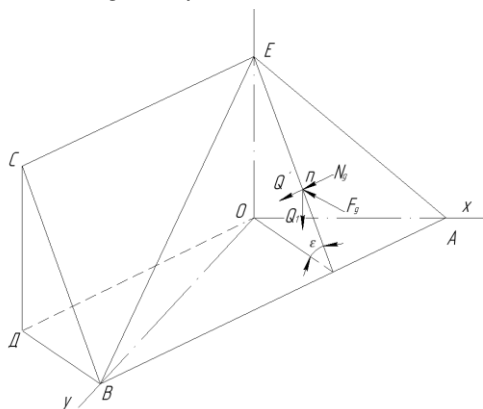


Рисунок 1 – Трехгранный косо поставленный плоский клин

Абразивные частицы почвы под действием приложенного к ним нормального давления и сдвигающего усилия производят изнашивание его. При этом нормальное давление почвы на клин состоит из динамического и статистического давления пласта.

На плоский клин, представленный на рисунке 1 ВСЕА, при перемещении почвы действуют силы в точке n от веса пласта Q_1 динамического давления N_g и трения F .

Величину абразивного изнашивания можно представить в виде:

$$G = f(p, s, H, m, q),$$

где: p – нормальное динамическое давление почвы на клин; s – путь трения; H – твердость металла; m – показатель изнашивающей способности абразива; q – площадь трения.

Зависимость интенсивности изнашивания деталей в абразивной среде от давления и пути трения аналогична износу деталей при трении об абразивную поверхность:

$$\frac{\Delta G}{\Delta s} = kp. \quad (1)$$

Если выразить путь трения через время и скорость относительного перемещения абразивных частиц, уравнение примет вид:

$$\frac{\Delta G}{\Delta t} = kp\vartheta_{\text{отн}},$$

где: k – коэффициент пропорциональности, зависящий от физико-механических свойств и состояния почвы; $\vartheta_{\text{отн}}$ – скорость относительного перемещения частиц абразива по поверхности трения.

Нормальное давление p есть результат действия веса частиц почвы (пласта) и проекции силы динамического давления почвы на нормаль к поверхности клина:

$$F_g = \vartheta_{\text{отн}} \frac{\Delta m}{\Delta t}, \quad (2)$$

Здесь: F – сила динамического давления почвы на клин; $\vartheta_{\text{отн}}$ – абсолютная скорость почвенных частиц после вступления на клин; m – масса почвы, поступившая на клин в единицу времени.

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{ab\delta}{g} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{ab\delta\vartheta_n}{g}, \quad (3)$$

где: a и b – толщина и ширина элемента пласта; δ – объемный вес почвы; ϑ_n – поступательная скорость клина; g – ускорение силы тяжести.

При перемещении клина в почве абразивные частицы пласта совершают сложное движение: переносное (вместе с клином) и относительное (по рабочей поверхности клина).

Модуль абсолютной скорости:

$$\vartheta_{abc} = \sqrt{\vartheta_n^2 + \vartheta_{отн}^2 - 2\vartheta_n\vartheta_{отн} \cos \alpha}. \quad (4)$$

Степень уменьшения скорости движения контактируемых частиц:

$$\Delta = \frac{\vartheta_{отн}}{\vartheta_n}.$$

Выразим относительную скорость движения $\vartheta_{отн}$ почвенных частиц через поступательную:

$$\vartheta_{abc} = \vartheta_n \sqrt{1 + \Delta^2 - 2\Delta \cos \alpha}.$$

Подставив значение $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ из формулы (3) в выражение (2) и заменив ϑ_{abc} через его значение, получим:

$$F_g = \frac{ab\delta\vartheta_n^2}{g} \sqrt{1 + \Delta^2 - 2\Delta \cos \alpha}.$$

Проекция силы F_g на направление нормали к поверхности клина ABC

$$N_g = \frac{ab\delta}{g} \vartheta_n^2 \sin \varepsilon \sin \gamma.$$

Вес элемента почвы, находящегося на клине

$$Q = abl\delta.$$

Проекция силы на направление нормали к поверхности клина

$$Q' = abl\delta \cos \varepsilon.$$

Общее нормальное давление элемента пласта на клин:

$$p = ab\delta \left(\frac{\vartheta_n^2 \sin \varepsilon \sin \gamma}{g} + l \cos \varepsilon \right).$$

Сила трения

$$F = f \left[ab\delta \left(\frac{\vartheta_n^2 \sin \varepsilon \sin \gamma}{g} + l \cos \varepsilon \right) \right].$$

Подставив значение p в уравнение (1), получим

$$\frac{\Delta G}{\Delta s} = kab\delta \left(\frac{\vartheta_n^2 \sin \varepsilon \sin \gamma}{g} + l \cos \varepsilon \right), \quad (5)$$

или

$$\frac{\Delta G}{\Delta t} = kab\delta \left(\frac{\vartheta_n^2 \sin \varepsilon \sin \gamma}{g} + l \cos \varepsilon \right) \vartheta_{отн}.$$

Для двугранного клина уравнение (5) примет вид:

$$\frac{\Delta G}{\Delta t} = kab\delta \left(\frac{\vartheta_n^2 \sin \varepsilon \sin \gamma}{g} + l \cos \varepsilon \right).$$

При перемещении почвы по клину вначале происходит смятие пласта, а затем скалывание его. С увеличением угла наклона клина (угла резания) смятие усиливается и перемещение пласта по клину затрудняется. При этом скорость скольжения по клину контактируемых с ним частиц грунта уменьшается до нуля, а давление почвы на клин возрастает. Износ клина при $\vartheta_{\text{отн}} = 0$ отсутствует. Это условие обеспечивается при $\varepsilon = 90^\circ$ и $\gamma = 90^\circ$.

Для пластинки, движущейся в почве, при $\varepsilon = 0$ и $\gamma = 90^\circ$ выражение (5) примет вид:

$$\frac{\Delta G}{\Delta s} = kab\delta \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что для пластинки, движущейся в почве с углом резания $\varepsilon = 0$, интенсивность изнашивания не зависит от скорости перемещения и пропорциональна размерам и объемному весу пласта при прочих равных условиях.

Деформация почвы под действием клина с вогнутой рабочей поверхностью большая, чем деформация, вызванная плоским клином.

Интенсивность изнашивания криволинейной поверхности

$$\frac{\Delta G}{\Delta s} = kab\delta \left(\frac{\vartheta_{\text{отн}}^2 k_n}{g} + l \cos \varepsilon \right).$$

При увеличении кривизны и угла постановки криволинейной поверхности подъем пласта затрудняется, почва сильно деформируется и сгруживается перед клином. При этом повышается нормальное давление почвы на клин, скорость относительного скольжения пласта по криволинейной поверхности уменьшается. На трущейся поверхности клина образуются застойные зоны почвенных частиц и ее изнашивание уменьшается.

В третьей главе «Материалы, программа и методики исследования»

Лабораторные
- Испытания на абразивный износ
- Испытания на коррозионную стойкость
- Испытания на почвенном стенде

Натурные
- Натурные испытания на абразивное изнашивание в полевых условиях ФГБНУ ФИЦ Картофеля имени А. Г. Лорха

представлены основное оборудование, материалы и методические приемы, принятые при выполнении работы.

При проведении исследований низколегированных сталей определялись их механические свойства по общепринятым методикам: твердость по методу Виккерса ГОСТ 2999-75; прочность, предел текучести, относительное удлинение по ГОСТ 1497-84; ударная вязкость по ГОСТ 9454-78.

Металлографические исследования после различных режимов термической обработки были выполнены с использованием просвечивающего

Рисунок 2 – Программа исследований

электронного микроскопа (ПЭМ) JEOL JEM 2100 и с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) FEI Quanta 600 FEG. Для

получения карт дифракции обратно-рассеянных электронов (ДОРЭ) по линиям Кикучи была использована камера EDAX Velocity™. Образцы для РЭМ и тонкие фольги для ПЭМ были приготовлены методом двухсторонней струйной электролитической полировки на установке Struers «Тенорол-5». Обработка результатов ДОРЭ выполнялась с использованием программного обеспечения OIM Analysis, а реконструкции исходных аустенитных зерен и анализ мартенситной структуры были осуществлены с использованием имплементированного кристаллографического алгоритма MTEX 5.8 с набором инструментов ORTools. Анализ методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) был выполнен с использованием калориметра SDT Q600 (TA Instruments). Измерение содержания остаточного аустенита определялось методом определения магнитного поля насыщения образца с использованием ферритометра Helmut Fischer FMP30.

Испытания на износостойкость проводили по методу испытаний материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы по ГОСТ 23.208-79. Исследование процесса износа в почвенной среде проводили на круговом почвенном стенде конструкции ФГБНУ ВНАЦ ВИМ. Испытания на коррозионную стойкость проводили в камере соляного (морского) тумана КСТ-18/001 по методу ускоренных коррозионных испытаний согласно ГОСТ 9.308-85.

Натурные (полевые) испытания проводились на примере стрелчатых лап в ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха» Люберецкого района Московской области.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований» представлены результаты проведенных экспериментальных исследований. На рисунке 3 показана структура стали 0,34C-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti после горячей прокатки, закалки при температуре 900 °С и последующем отпуске при температурах: 200 °С; 280 °С; 400 °С; 500 °С.

Среднее расстояние между БУГ в листах стали 0,34C-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti после закалки составило $1,4 \pm 0,1$ мкм (рисунок 3, а). Дальнейшее проведение отпуска в интервале температур от 200 °С до 500 °С приводит к росту зерен до $2,9 \pm 0,1$ мкм (рисунок 3 б-д). Плотность геометрически необходимых дислокаций, рассчитанная по КАМ, уменьшилась на 59% с увеличением температуры отпуска до 500 °С.

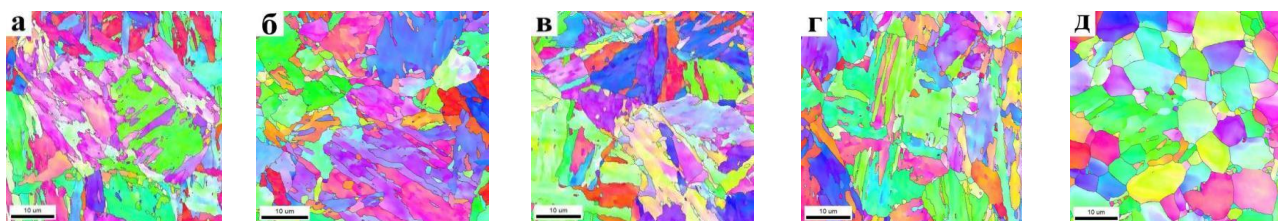


Рисунок 3 – Карты распределения ориентировок (ДОРЭ) листов стали 0,34C-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti после горячей прокатки, подвергнутые закалке при температуре 900 °С (а) и последующем отпуске при температуре: 200 °С (б); 280 °С (в); 400 °С (г); 500 °С (д)

Анализ картин ДОРЭ показал, что структура стали 0,33С-1,85Si-1,44Mn-0,58Cr после закалки состоит из реечного мартенсита с небольшим количеством остаточного аустенита, расположенного по высокоугловым границам (рисунок 4).

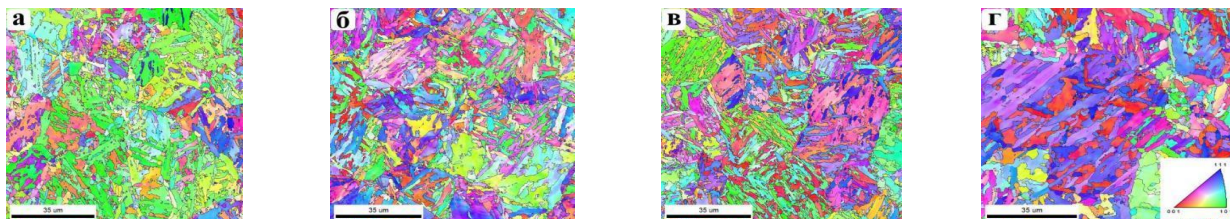


Рисунок 4 - Карты распределения ориентировок (ДОРЭ) стали 0,33С-1,85Si-1,44Mn-0,58Cr после закалки при 900 °С и отпуска при температуре: 200 °С (а); 280 °С (б); 400 °С (в); 500 °С (г)

Среднее расстояние между БУГ в стали 0,33С-1,85Si-1,44Mn-0,58Cr после отпуска при температуре 500 °С увеличивается до 1.62 ± 0.15 мкм по сравнению с 0.81 ± 0.15 мкм в стали после закалки. Ширина мартенситных реек монотонно увеличивается с увеличением температуры отпуска. Плотность дислокаций, рассчитанная по изображениям ПЭМ после закалки, составляет $2,7 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$, и практически не изменяется при отпуске при температурах ≤ 280 °С. Отпуск при температуре 500 °С в течение 1 часа приводит к уменьшению плотности решеточных дислокаций на 35 %. На рисунке 5 представлена структура стали 0,43С-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti после закалки и последующего отпуска. Структура состоит из реечного мартенсита с небольшим количеством остаточного аустенита (не превышает 1%).

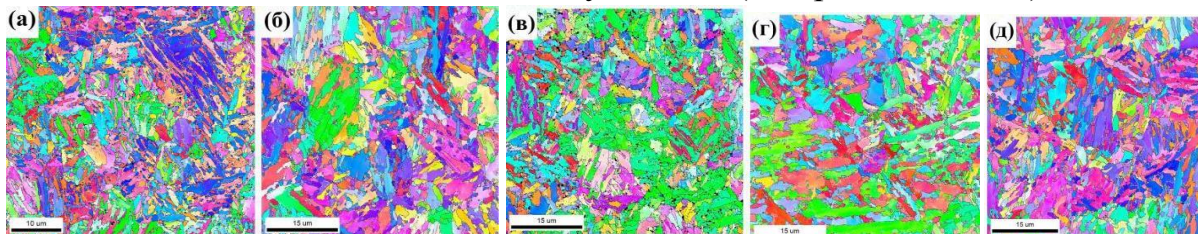


Рисунок 5 – Карты распределения ориентировок (ДОРЭ) стали 0,43С-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti после закалки при температуре 900 °С (а) и последующего отпуска при температуре: 200 °С (б); 280 °С (в); 400 °С (г); 500 °С (д)

Средний размер исходных аустенитных зерен в состоянии после закалки составляет 12,2 мкм, а среднее расстояние между высокоугловыми границами составляет 0,84 мкм. Отпуск не приводит к изменению среднего размера исходных аустенитных зерен и среднего расстояния между высокоугловыми границами. Поперечный размер реек после закалки составляет 137 нм, плотность дислокаций внутри реек $1,5 \times 10^{15} \text{ м}^{-2}$. Внутри реек наблюдаются наноразмерные частицы карбонитридов МХ размером 9 нм. В микроструктуре также были выявлены крупные карбонитриды размером 60 нм. Средний размер карбонитридов МХ составляет 40 нм. Отпуск при температуре 280 °С приводит к увеличению толщины реек до 152 нм.

Анализ картин ДОРЭ стали 0,33С-1,85Si-1,44Mn-0,58С показал наличие крупных мартенситных блоков внутри исходных аустенитных зерен (рисунок 6 а-ж).

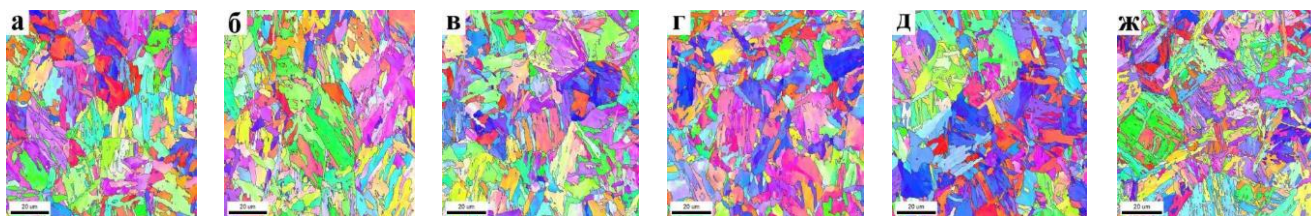


Рисунок 6 – Карты ориентировок (ДОРЭ) листов стали 0,33С-1,85Si-1,44Mn-0,58Cr после горячей прокатки, закалки при температуре 210 °С (а, б, в) и 230 °С (г, д, ж) длительностью 30 (а, г), 100 (б, д) 600 секунд (в, ж), и распределении при температуре 350 °С в течение 1000 секунд

Таблица 1 – Механические свойства сталей после термической обработки, включающей закалку и последующий отпуск

Режим обработки	Твердость, HRC	Предел текучести ($\sigma_{0,2}$), МПа	Предел прочности (σ_b), МПа	Удлинение (δ), %	Ударная вязкость, Дж/см ²
0,34C-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,03Ti					
Закалка 900°С	54	1280	1870	7,5	17,4
Закалка 900°С + отпуск 200°С 60 минут	54	1430	1870	9,0	30,8
Закалка 900°С + отпуск 280°С 60 минут	52,5	1490	1800	8,0	34,7
Закалка 900°С + отпуск 400°С 60 минут	50,2	1420	1640	7,5	22,8
Закалка 900°С + отпуск 500°С 60 минут	43,0	1160	1300	10,5	37,5
0,33C-1,85Si-1,44Mn-0,58Cr					
Закалка 900°С	54,1	1230	1850	5,6	12,5
Закалка 900°С + отпуск 200°С 60 минут	49,7	1210	1670	5,8	13,6
Закалка 900°С + отпуск 280°С 60 минут	50,7	1430	1710	6,2	23,2
Закалка 900°С + отпуск 400°С 60 минут	48,2	1380	1590	7,0	19,6
Закалка 900°С + отпуск 500°С 60 минут	41,2	1130	1230	8,9	31
0,43C-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti					
Закалка 900°С	55	1445	2170	7,2	10
Закалка 900°С + отпуск 200°С 60 минут	54	1625	2120	8,2	12
Закалка 900°С + отпуск 280°С 60 минут	54	1695	2040	8,0	14
Закалка 900°С + отпуск 400°С 60 минут	53	1690	1930	6,7	12
Закалка 900°С + отпуск 500°С 60 минут	50	1415	1680	10,2	21
Закалка 900°С + отпуск 600°С 60 минут	48	1460	1580	11,5	26
Закалка 900°С + отпуск 650°С 60 минут	44	1310	1390	9,2	33

Объемная доля остаточного аустенита в стали 0,33С-1,85Si-1,44Mn-0,58Cr после обработки закалка-распределение варьируется от 10,72 до 14,51%, при этом, с увеличением времени операции распределения, объемная доля аустенита уменьшается для обеих температур закалки. Плотность дислокаций, рассчитанная по методу Кернела, составляет $5-6 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$. Изменение

температуры закалки и времени распределения не оказывает существенного влияния на расстояние между большеугловыми границами в структуре стали после обработки. Сравнение численных значений механических свойств сталей представлены в таблицах 1-2.

При обработке закалка 210 °С, распределение 350 °С 1000 с значения ударной вязкости составляет 74 Дж/см², что в 2 раза выше, чем при обработке закалка 900 °С и отпуск 500 °С и в 6 раз выше, чем при закалке без отпуска. При остальных исследованных режимах обработки закалка – распределение также достигаются более высокие значения ударной вязкости в сравнении со стандартной закалкой и отпуском.

Таблица 2 – Механические свойства стали 0,33С-1,85Si-1,44Mn-0,58Cr после обработки закалка-распределение

Обработка	Твёрдость, HRC	Условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$), МПа	Предел прочности (σ_B), МПа	Удлинение (δ), %	Ударная вязкость, Дж/см ²
Аустенизация 900 °С, закалка 210 °С, распределение 350°С 300с	50,0 ± 0,9	1100	1730	5.9	-
Аустенизация 900 °С, закалка 210 °С, распределение 350°С 600с	48,0 ± 1,4	1240	1560	13.55	59,6
Аустенизация 900 °С, закалка 210 °С, распределение 350°С 1000с	47,7 ± 0,4	1300	1520	10.34	74
Аустенизация 900 °С, закалка 230 °С, распределение 350°С 300с	50,2 ± 0,9	1060	1700	12.22	-
Аустенизация 900 °С, закалка 230 °С, распределение 350°С 600с	48,1 ± 0,8	1210	1540	12.86	-
Аустенизация 900 °С, закалка 230 °С, распределение 350°С 1000с	47,6 ± 0,9	1160	1450	11.58	-

Анализ результатов механических свойств сталей и микроструктурных исследований позволил определить оптимальную температуру отпуска 280 °С, обеспечивающая требуемый комплекс механических свойств при традиционной термической обработке. Поэтому данная температура была применена при изготовлении образцов для лабораторных (таблица 3-5) и натуральных испытаний.

Таблица 3 – Результаты испытаний на абразивное изнашивание

№	Тип образца	Твёрдость, HV	Интенсивность износа, г/м	Относ. износост.
1	Сталь 45 (эталон)	202,4	0,1000	1,0000
2	65Г (закалка 830°С в масло + отпуск 400С 1ч.)	258,2	0,0965	1,0391
3	0,33С-1,85Si-1,44Mn-0,58Cr	485	0,0775	1,2943
4	0,34С-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti	559,8	0,0663	1,5131
5	0,43С-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti	610	0,0651	1,5405

Результаты опытов приведены в виде графика (рисунок 7), из которого следует, что интенсивность изнашивания термически обрабатываемых легированных сталей находится в обратной зависимости от их твердости. С увеличением ее интенсивность износа уменьшается.

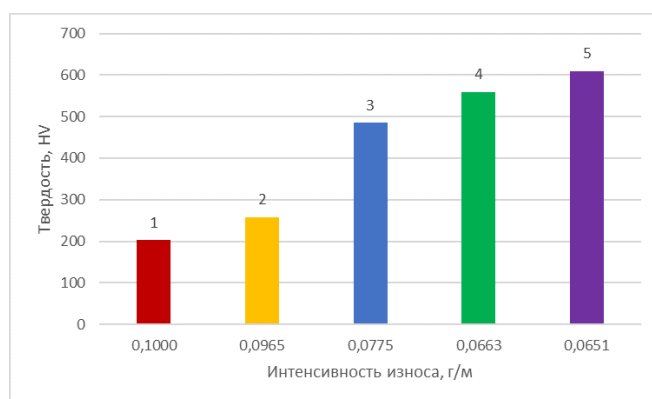


Рисунок 7 – Зависимость интенсивности износа от твердости образцов стали: 1) 45; 2) 65Г; 3) 0,33С-1,85Si-1,44Mn-0,58Cr; 4) 0,34С-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti 5) 0,43С-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti

Высокая износостойкость стали 0,43С-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti обусловлена повышенным содержанием углерода наряду с карбидообразующими элементами. Однако износостойкость стали 0,34С-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti ниже стали 0,43С-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti на 1,5 %, что обусловлено повышенным содержанием кремния. При этом износостойкость этих сталей выше на 30 % широко используемой стали 65Г.

Результаты исследования коррозионной стойкости показали высокую стойкость сталей 0,33С-1,85Si-1,44Mn-0,58Cr и 0,34С-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti за счет добавления легирующих компонентов, позволяющих образовывать на поверхности пассивирующие пленки, препятствующие образованию коррозии.

Таблица 4 – Результаты испытаний на коррозионную стойкость

Тип образца	Скорость коррозии (г/м ² *ч)	Коррозионная стойкость
Сталь 45 (эталон)	0,2336	1,00
30ХГСА	0,2658	0,87
65Г	0,2687	0,86
0,34С-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti	0,1524	1,53
0,33С-1,85Si-1,44Mn-0,58Cr	0,1480	1,57
0,43С-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti	0,4142	0,56

Результаты исследования на круговом почвенном стенде по установлению величины износа рабочих органов от наработки представлены в таблице 5 и рисунках 8-10.

Таблица 5 – Результаты износа сталей после 160 часов испытаний

№ п/п	Образец	Твердость, HV	Относительная износостойкость
1	Сталь 45	210,3	1,0000
2	Сталь 65Г	459	1,1582
3	30ХГСА	328,8	0,8295
4	0,34С-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti	556,8	1,9632
5	0,33С-1,85Si-1,44Mn-0,58Cr	471	1,4257
6	0,43С-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti	566	1,7093

Полученные данные износа показывают увеличение износостойкости для стали 0,34C-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti по сравнению с со сталью 45 в 1,9 раз.

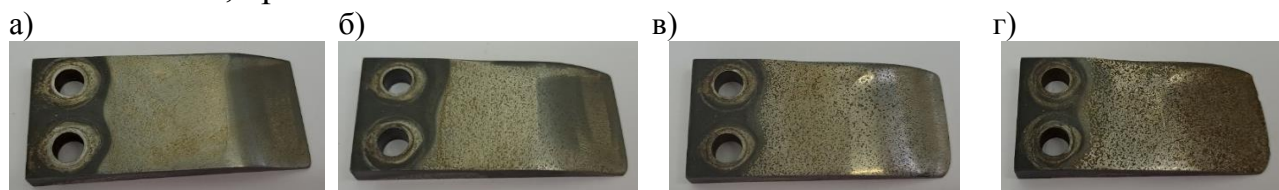


Рисунок 8 – Сталь 0,34C-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti с термической обработкой Q&T после: а) 40 часов; б) 80 часов; в) 120 часов; г) 160 часов испытаний

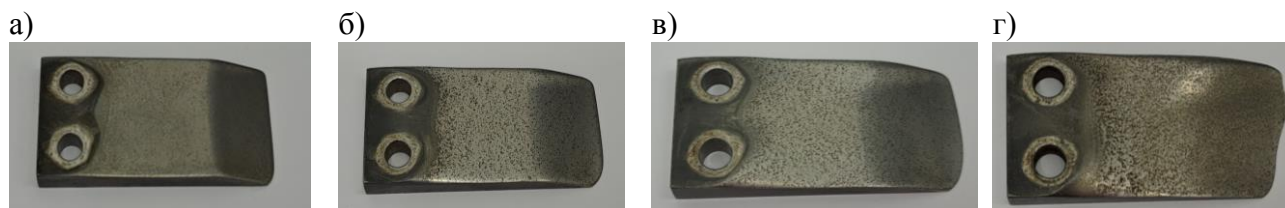


Рисунок 9 – Сталь 45 с термической обработкой Q&T после: а) 40 часов; б) 80 часов; в) 120 часов; г) 160 часов испытаний

Относительная износостойкость стали 0,34C-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti с термической обработкой закалка при температуре 210 °C в течении 30 секунд и распределение при температуре 350 °C в течении 1000 секунд выше износостойкости стали 45 в 2,6 раз.

Внешний вид образцов после испытаний стали 0,34C-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti после обработки закалка-распределение при температуре закалки 210 °C в течении 30 секунд и температуре распределения 350 °C в течении 100 секунд представлен на рисунке 9.

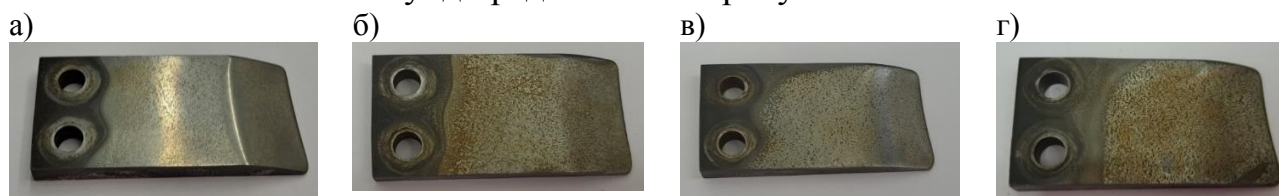


Рисунок 10 – Сталь 0,34C-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti с термической обработкой Q&P после: а) 40 часов; б) 80 часов; в) 120 часов; г) 160 часов испытаний

Результаты натурных (полевых) испытаний показали наименьший износ стали 0,34C-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti. Ее стойкость выше стали 30 на 15%, стали 30ХГСА на 25%, 55С2 на 50%. Внешний вид лап для испытаний представлен на рисунке 11 (а, б).



Рисунок 11 – Лапа культиватора КРН-220 до испытаний: а – серийная деталь, б – деталь с приваренными пластинами

Таким образом, результаты проведенных исследований подтверждают целесообразность применения разработанных сталей для изготовления рабочих органов сельскохозяйственных машин.

В пятой главе «Технология изготовления и ее экономическая эффективность» на основании комплекса проведенных теоретических и экспериментальных исследований, разработана и предложена производству технология упрочнения режуще-лезвийной поверхности рабочих органов почвообрабатывающих машин низколегированными сталями. Разработанная технология включает в себя следующие основные операции: зачистку режуще-лезвийной поверхности рабочего органа, резку пластин стали необходимого размера, термическую обработку по рекомендуемым режимам, приварку очищенных от окалины пластин, контроль качества полученного сварного изделия.

Разработанные лапы культиватора, при достижении предельного состояния, могут быть восстановлены с помощью замены изношенных элементов (новых режуще-лезвийных частей), которые изготавливаются и привариваются вместо отрезанных изношенных частей. В результате возможно, как минимум двукратное возобновление ресурса лап культиватора, что позволит производителям сельскохозяйственной продукции сэкономить значительные денежные средства на приобретении новых, дорогостоящих рабочих органов.

Ожидаемый расчетный годовой экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии составит 758610 рублей при упрочнении 1000 стрельчатых лап культиватора, что подтверждает целесообразность ее внедрения в производство. Срок окупаемости капитальных вложений – 2,5 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны химические составы износостойких низколегированных сталей 0,33C-1,85Si-1,44Mn-0,58Cr; 0,34C-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti; 0,43C-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti.

2. Разработаны режимы термической обработки для разработанных сталей, включающие в себя: 1) горячую прокатку при температуре 1000 °С, закалку при температуре 900 °С и последующий отпуск при температуре 280 °С; 2) горячую прокатку при температуре 1000 °С, закалку при температуре 210 °С длительностью 100 с и распределение при температуре 350 °С с временем выдержки 1000 с.

3. Изготовлена опытная партия листового проката из разработанных низколегированных сталей.

4. Достигнуты наилучшие показатели механических свойств низколегированных сталей при традиционной термической обработке, включающей горячую прокатку при температуре 1000 °С, закалку при температуре 900 °С и последующий отпуск при температуре 280 °С: для стали 0,33C-1,85Si-1,44Mn-0,58Cr твердость составляет 50,7 HRC, предел текучести 1430 МПа, предел прочности 1710 МПа, относительное удлинение 7 %, ударная вязкость 23,2 Дж/см²; для стали 0,34C-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti твердость составляет 52,5 HRC, предел текучести 1490 МПа, предел прочности 1800 МПа, относительное удлинение 8 %, ударная вязкость 34,7 Дж/см²; для стали 0,43C-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti

твердость составляет 54 HRC, предел текучести 1695 МПа, предел прочности 2040 МПа, относительное удлинение 7 %, ударная вязкость 14 Дж/см²;

5. Показатели механических свойств стали 0,33C-1,85Si-1,44Mn-0,58Cr после термической обработки, включающей в себя горячую прокатку при температуре 1000 °С, закалку при температуре 210 °С длительностью 30 с и распределение при температуре 350 °С с временем выдержки 1000 с, показали повышение ударной вязкости в 2 раза и составляет 74 Дж/см², чем при обработке закалка 900 °С и отпуск 280 °С и в 6 раз выше, чем при закалке без отпуска.

6. Разработана технология упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин путем закрепления на наиболее изнашиваемые участки износостойких пластин, ресурс которых в 1,5 раза выше серийных.

7. Износостойкость рабочих органов почвообрабатывающих машин, изготовленных из разработанной стали 0,34C-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti работающих в условиях супесчаной почвы выше серийных на 20 %.

8. Экономическая эффективность от применения разработанной технологии для повышения долговечности рабочих органов составляет 758610 рублей. Срок окупаемости разработанной технологии составляет 2,5 года.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Ветрова, С.М. Износостойкость низколегированных сталей в абразивной среде / Ерохин М.Н., Гайдар С.М., Скороходов Д.М., Ветрова С.М., Барчукова А.С. //Агроинженерия. 2023. Т. 25. № 3. С. 72-78.

2. Ветрова, С.М. Влияние легирующих элементов и термической обработки на механические свойства низколегированных сталей / Гайдар С.М., Ветрова С.М., Барчукова А.С. // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2023. № 9. С. 11-15.

3. Кратномасштабный вейвлет-анализ профилограммы / С. М. Гайдар, А. Е. Павлов, А. М. Пикина, С. М. Ветрова // Агроинженерия. – 2022. – Т. 24, № 5. – С. 62-66. – DOI 10.26897/2687-1149-2022-5-62-66.

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

4. Vetrova, S. Tempering behavior of novel low-alloy high-strength steel / Dudko V., Yuzbekova D., Gaidar S., Vetrova S., Kaibyshev R. // Metals. 2022. Т. 12. № 12. С. 2177.

Публикации в других изданиях:

5. Vetrova, S.M. Effect of tempering on microstructure and mechanical properties of novel low-alloy high strength steel / Yuzbekova, D.Y., Gaidar, S.M., Vetrova, S.M., Dudko, V.A. // AIP Conference Proceedings., 2023, 2899(1), 020152.

6. Vetrova, S.M. Influence temperatures of tempering on mechanical properties of steel 60si2crvnb / Yuzbekova D.Y., Dudko V.A., Vetrova S.M., Gaidar S.M., Kaibyshev R.O. // В книге: Advanced High Entropy Materials. Abstracts of the IV International Conference and School of Young Scientists. Belgorod, 2022. С. 159.

7. Ветрова, С.М. Влияние температуры отпуска на структуру и механические свойства высокопрочной низколегированной стали / Дудко В.А., Юзбекова Д.Ю., Гайдар С.М., Ветрова С.М., Кайбышев Р.О. // В книге: Физическая мезомеханика материалов. Физические принципы формирования многоуровневой структуры и механизмы нелинейного поведения. Тезисы докладов Международной конференции. Новосибирск, 2022. С. 124.

8. Ветрова, С.М. Упрочнение рабочих органов сельхозтехники с помощью термической обработки / Ветрова С.М., Барчукова А.С., Гайдар С.М. // В сборнике: Чтения академика В. Н. Болтинского. 2023. С. 103-110.

9. Ветрова, С.М. Изучение механических свойств низколегированных сталей / Барчукова А.С., Ветрова С.М., Гайдар С.М. // Техника и технологии: теория и практика. 2023. № 1 (7). С. 16-22.

10. Ветрова, С.М. Закономерности изменения микроструктуры и механических свойств при отпуске ультравысокопрочной стали / Юзбекова Д.Ю., Дудко В.А., Тихонова М.С., Ветрова С.М., Гайдар С.М., Кайбышев Р.О. // В книге: Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии. Тезисы докладов Международной конференции. Томск, 2023. С. 207-208.

11. Ветрова, С.М. Определение коррозионной стойкости низколегированной стали / Ветрова С.М., Барчукова А.С. // В сборнике: Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции - новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства. Сборник научных докладов XXII Международной научно-практической конференции. Тамбов, 2023. С. 196-198.

12. Ветрова, С.М. Влияние термической обработки на механические свойства низколегированной стали / Ветрова С.М., Барчукова А.С. // В книге: Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности. Материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых. Могилев, 2023. С. 54.

Патенты:

13. Патент № 2813069 С1 Российская Федерация, МПК С21D 8/02, С21D 9/46, С22С 38/22. Способ получения высокопрочного стального листа: № 2023113034: заявл. 19.05.2023: опубл. 06.02.2024 / Р. В. Мишнев, Ю. И. Борисова, Л. Г. Ригина [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева".