

Научная статья
УДК 631.3:621.785

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ЛЕМЕШНОЙ СТАЛИ

¹Сергей Александрович Феськов, ²Игорь Николаевич Кравченко,

¹Людмила Ивановна Бишутина, ¹Владимир Иванович Самусенко

¹ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, Брянская область, Кокино, Россия

²ФГБУН Институт машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

Аннотация. В статье проведен анализ существующих методов термической обработки лемешных сталей, выявлены их недостатки и предложены направления для оптимизации технологии. Выполнен анализ методов повышения износостойкости плужных лемехов, изготовленных из среднеуглеродистой стали Л53. Основное внимание уделено оптимизации режимов термической обработки (ТО) как ключевого фактора улучшения эксплуатационных характеристик. Экспериментально установлено, что нагрев до температурного диапазона 840–860°C с последующим охлаждением в воде способствует формированию мартенситной структуры, обеспечивающей максимальную твердость (54–58 HRC) и износостойкость (до 50 мин/г). Показано, что применение предложенных режимов ТО позволяет повысить ресурс лемехов более чем в 2,5 раза по сравнению с серийными образцами. Выявлено, что превышение температуры свыше 860°C приводит к охрупчиванию материала, снижая его эксплуатационную надежность. Результаты исследования имеют практическую значимость для сельскохозяйственного машиностроения, направленную на снижение затрат при обслуживании почвообрабатывающей техники.

Ключевые слова: лемешная сталь; плужные лемеха; термическая обработка; износостойкость; абразивный износ.

Для цитирования: Влияние термической обработки на износостойкость лемешной стали / С.А. Феськов, И.Н. Кравченко, Л.И. Бишутина, В.И. Самусенко // Вестник Брянской ГСХА. 2025. № 4 (110). С. 62-67.

Original article

EFFECT OF HEAT TREATMENT ON WEAR RESISTANCE OF PLOUGHSHARE STEEL

¹Sergey A. Fes'kov, ²Igor' N. Kravchenko, ¹Lyudmila I. Bishutina, ¹Vladimir I. Samusenko

¹Bryansk State Agrarian University, Bryansk Region, Kokino, Russia

² Institute of Mechanical Science named after A. A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The article analyzes the existing methods of heat treatment of plowshares steels, identifies their shortcomings and suggests directions for technology optimization. The analysis of methods for increasing the wear resistance of plowshares made of medium-carbon steel L53 is performed. The main attention is paid to the optimization of heat treatment (HT) modes as a key factor in improving performance characteristics. It was experimentally established that heating to a temperature range of 840–860°C with subsequent cooling in water contributes to the formation of a martensitic structure providing maximum hardness (54–58 HRC) and wear resistance (up to 50 min/g). It is shown that the use of the proposed HT modes allows increasing the resource of plowshares by more than 2.5 times compared to serial samples. It was revealed that exceeding the temperature above 860°C leads to embrittlement of the material, reducing its operational reliability. The results of the study have practical significance for agricultural engineering, aimed at reducing costs in servicing tillage equipment.

Keywords: ploughshare steel; plowshares; heat treatment; wear resistance; abrasive wear.

For citation: Effect of heat treatment on wear resistance of ploughshare steel / S.A. Fes'kov, I.N. Kravchenko, L.I. Bishutina, V.I. Samusenko // Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy. 2025. 4 (110): 62-67.

Введение. Постановка задачи. Износ плужных лемехов остается одной из наиболее значимых технических проблем в сельскохозяйственном производстве [1, 2]. Постоянное взаимодействие этих деталей с абразивной почвенной средой приводит к значительному снижению их эксплуатационных характеристик, что увеличивает затраты на ремонт и замену [3, 4]. Срок службы лемехов определяется износостойкостью используемых материалов, в частности, их твердостью и прочностью [5]. Несмотря на многочисленные исследования, направленные на повышение износостойкости, вопрос остаётся открытым, особенно в контексте применения комбинированных методов термического упрочнения [6].

Существующие методы улучшения эксплуатационных характеристик лемехов включают классическую термообработку, наплавочное армирование и использование износостойких сталей. Классическая закалка и отпуск применяются только в режущей области лемеха, что приводит к неравномерному износу и ограничивает общую эффективность [7]. Наплавочное армирование обеспечивает локальное повышение твердости, но обладает рядом технологических ограничений, таких как небольшая глубина упрочнения и сложность контроля термических процессов [8]. Использование высоколегированных сталей, несмотря на их потенциальные преимущества, сопровождается значительными трудностями в обработке и высокой стоимостью [9]. Таким образом, ни один из существующих технологических подходов не обеспечивает комплексного решения проблемы повышения износостойкости лемехов при сохранении их экономической эффективности.

Цель настоящей работы - провести анализ существующих методов термообработки, выявить их недостатки и предложить направления для оптимизации технологии. Основное внимание уделяется вопросам термической обработки, которая остается наиболее перспективным, но недостаточно изученным методом повышения износостойкости.

Обзор материалов и методов. Плужные лемеха изготавливаются из специальной лемешной стали с содержанием углерода не ниже 0,4% (Л53, Л65), то есть применяются средне- и высокоуглеродистые стали. По некоторым источникам [10] в качестве материала может использоваться сталь 45. Следует отметить, что использование стали 45 носит эпизодический характер и ограничивается отдельными случаями, в связи с чем её свойства и характеристики в рамках данного исследования рассматриваться не будут.

Физико-механические свойства стали определяются химическим составом сплава, его структурой и особенностями технологического процесса производства [11]. Существенное влияние на отмеченные выше показатели может оказывать термическая обработка или другие упрочняющие мероприятия.

Химический состав лемешных сталей представлен в таблице 1, в соответствии с ГОСТ 380-50.

Марка стали	Углерод (C), %	Марганец (Mn), %	Кремний (Si), %	Сера (S), % (не более)	Фосфор (P), % (не более)
Л53	0,47-0,59	0,50-0,80	0,15-0,40	0,05	0,05
Л65	0,60-0,70	0,30-0,60	0,15-0,40	0,05	0,045

Лемешные стали относятся к группе доэвтектоидных сталей и имеют структуру, представленную ферритно- перлитной смесью с преобладанием перлитной составляющей. Структура этих сталей представлена на рисунке 1 а и б.

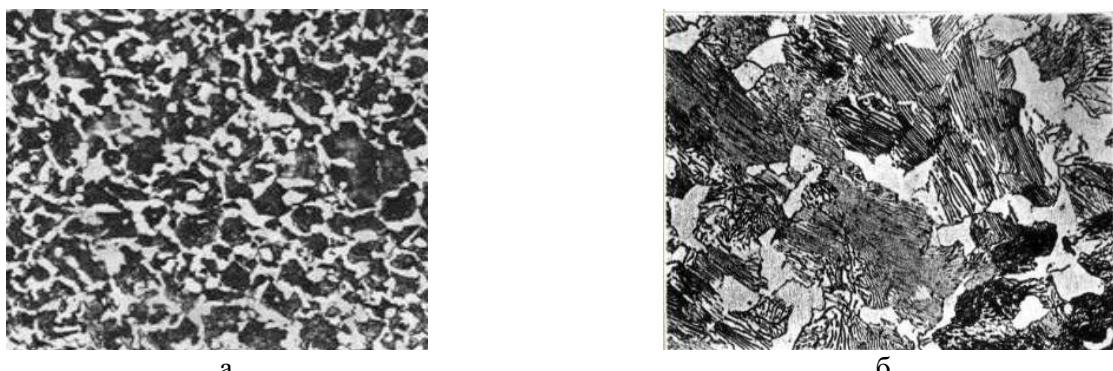


Рисунок 1 - Микроструктуры доэвтектоидных сталей

(а- сталь с содержанием углерода 0,50%; б- сталь с содержанием углерода 0,60%); $\times 500$

Механические свойства (таблица 2) рассматриваемых материалов определяют их пригодность для работы в условиях интенсивного абразивного износа.

Таблица 2 - Механические свойства

Марка стали	Предел прочности (σ_b), МПа	Предел текучести (σ_t), МПа	Относительное удлинение (δ), %	Твердость (НВ)
Л53	640	380	14	241
Л65	980	785	10	229

Исходя из данных таблицы 2 следует, что твердость отличается невысоким значением, не превышающим 241НВ. Столь незначительная величина позволяет сделать заключение о невысокой

абразивной стойкости приведенных в таблице 2 материалов, так как интенсивность их изнашивания в абразивной массе достаточно велика.

Повышение твердости, а, следовательно, и абразивной износостойкости может быть достигнуто применением термической обработки (ТО). Следует отметить, что ТО относится к одному из самых распространенных способов повышения механических свойств металлических тел (твердость, прочность, абразивная износостойкость). В то же время, работы, посвященные данному вопросу немногочисленны, а выводы из них нередко носят противоречивый характер.

Применяемая на некоторых заводах при изготовлении лемехов «классическая» закалка (нагрев с последующим охлаждением со скоростью выше критической) нередко не обеспечивает должной эффективности [12]. Это обусловлено тем, что в соответствии с техническими условиями (ТУ) подобное термоупрочнение производится только в режущей лезвийной области, на высоту 20-30 мм. В силу совокупности недостатков, состоящих в неотработанности параметров режима термообработки, отсутствии соответствующих триботехнических лабораторных и полевых испытаний подобная технология не может быть рекомендована к широкому применению. Кроме того, отсутствие ТО по всей толщине детали, особенно в области носка, значительно ускоряет износ этой зоны, снижая общий ресурс изделия. Дополнительно следует учитывать, что при термоупрочнении изделий из средне- и высокоуглеродистых сталей важно обеспечить равномерный нагрев, чтобы скорость прогрева лезвия соответствовала темпу нагрева основной массы металла. Охлаждение должно осуществляться максимально быстро, чтобы предотвратить избыточное выделение феррита, что может отрицательно сказаться на механических свойствах материала [13].

Некоторые предприятия при производстве лемехов применяется усовершенствованная технология термической обработки, основанная на использовании остаточного нагрева после индукционной наплавки лезвия [14]. Однако такой подход приводит к снижению прочностных характеристик носовой части изделия, что увеличивает риск её деформации и разрушения в процессе эксплуатации.

Попытки заменить серийную сталь на износостойкие хромистые стали, такие как ХФ, ХГ, ШХ15, Х6Ф1 и Х12Ф1, не дали значимых результатов [15]. Несмотря на более низкую скорость износа таких лемехов, они теряют остроту значительно быстрее, что приводит к увеличению тягового сопротивления сельскохозяйственного агрегата. Кроме того, предельное состояние лемеха наступает при минимальном износе по ширине, что ограничивает его ресурс.

Методика проведения эксперимента. В рамках исследования были использованы образцы, вырезанные из российских цельнометаллических лемехов, изготовленных из прокатной стали для лемехов - Л53. В процессе отрезания для избежания влияния термического воздействия лемех подвергался дополнительному охлаждению. В процессе вырезки образцов для предотвращения влияния термического воздействия на структуру материала применялось дополнительное охлаждение лемеха

Образцы подвергались закалке от 710°C до 880°C с шагом в двадцать градусов. После нагрева образцы подвергались быстрому охлаждению в воде, что является классическим методом формирования неравновесных структур, в металлах и сплавах.

Оценка механических свойств проводилась методом Роквелло - HRC, который является стандартным и широко распространённым в металлургической промышленности. Твёрдость измерялась путём нанесения пяти отпечатков по всей площади поверхности образцов, что позволило получить усреднённое значение для более точной оценки характеристик материала и минимизировать влияние локальных неоднородностей.

Значения HRC контролировались как до термической обработки, так и после её завершения, что позволяло точно проанализировать влияние термической обработки на механические свойства материала.

Для проведения испытаний использовалась экспериментальная установка собственной разработки, обеспечивающая возможность ускоренного тестирования образцов в незакрепленной абразивной среде. Установка позволяет поддерживать идентичные условия износа исследуемых образцов в любой момент времени [16].

Испытания проводились в гравийно-песчаной смеси, которая имитировала абразивное воздействие, превышающее реальные условия эксплуатации, что позволяет оценить износостойкость исследуемых образцов. Общая продолжительность испытаний составила 140 минут, что позволяет объективно оценить стойкость.

Результаты исследования и их обсуждение. Повышение твёрдости материала напрямую связано с повышением температуры термической обработки, что полностью соответствует фундаментальным принципам металловедения. Все это объясняется протеканием фазовых превращений (рисунок 2) [17], происходящими при нагреве, а также изменением внутренней структуры материала, включая образование твёрдых фаз или улучшение их распределения.

Анализ экспериментальных данных показал, что минимальные значения твёрдости (15-20 HRC) наблюдаются при термообработке в температурном диапазоне 700-760°C. Приведённые значения твёрдости по шкале HRC сопоставимы с характеристиками материала в исходном состоянии, что обусловлено неизменностью структурных составляющих стали, в частности отсутствием фазовых превращений в данном температурном диапазоне.

На основании полученных данных (рисунок 2) установлено, что с увеличением температуры термообработки наблюдается значительный рост твёрдости материала. При нагреве до 850°C значения твёрдости достигают своего максимума, варьируясь в диапазоне 54-58 HRC. Все перечисленное обусловлено структурными преобразованиями, возникающими в ходе термической обработки, что, в свою очередь, способствует значительному улучшению механических свойств материала.

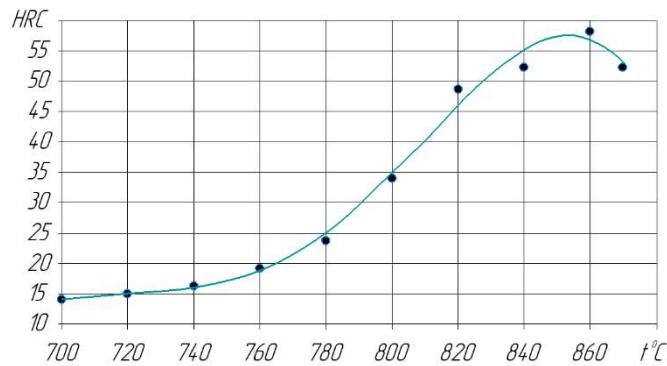


Рисунок 2 - Динамика HRC лемешной стали после термической обработки

Подводя итог вышесказанному, можно сделать вывод, что правильно подобранные режимы термической обработки обеспечивают значительное улучшение механических свойств стали, в том числе повышение её износостойкости более чем в два раза по сравнению с изделиями серийного производства. Полученные данные подтверждают эффективность термообработки стали Л53 для повышения эксплуатационных характеристик.

График «Зависимость износостойкости Л53 от температуры термообработки» (рис. 3) демонстрирует закономерное увеличение износостойкости материала с ростом температуры термообработки.

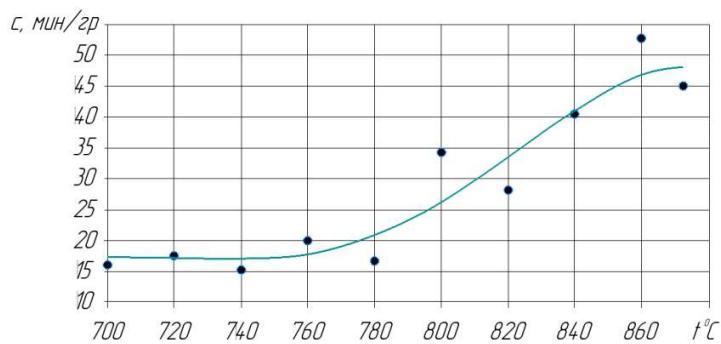


Рисунок 3 - Зависимость износостойкости Л53 от температуры ТО

Начальный этап (700-760°C). В этом диапазоне температур износостойкость сохраняется на низком и стабильном уровне (≈ 15 -18 мин/г), что свидетельствует об отсутствии значительных структурных изменений в стали. Это объясняется сохранением феррито-перлитной структуры и отсутствием фазовых превращений.

Пороговая зона (780-800°C). При повышении температуры до 780-800°C начинается существенное увеличение износостойкости, что может быть обусловлено перестройкой микроструктуры, в частности разупрочнением феррита.

Интенсивный рост (800-860°C). В диапазоне 800-860°C износостойкость возрастает наиболее динамично, достигая максимального значения (≈ 50 мин/г при 860°C). Этот эффект объясняется формированием мартенситной структуры при последующем охлаждении в воде, что приводит к значительному повышению твёрдости и, соответственно, стойкости к абразивному изнашиванию.

Снижение износостойкости (выше 860°C). При дальнейшем повышении температуры выше 860°C наблюдается снижение твёрдости, что связано с охрупчиванием структуры стали. Этот процесс приводит к ухудшению механических свойств, снижению эксплуатационной надёжности и, как следствие, снижает технологическую целесообразность термоупрочнения.

Таким образом, оптимальный температурный диапазон термообработки стали Л53 для повышения износостойкости составляет 840-860 °С. В этом интервале достигается максимальная эффективность упрочнения материала, что подтверждается полученными данными при проведении испытаний. Износостойкость стали при этом увеличивается более чем в 2,5 раза по сравнению с исходным состоянием.

Выводы. 1. Оптимальный температурный диапазон термообработки стали Л53 составляет 840-860 °С, что обеспечивает формирование мартенситной структуры, максимальные значения твёрдости (54-58 HRC) и износостойкости (≈ 50 мин/г).

2. Термическая обработка в указанном диапазоне позволяет повысить износостойкость стали более чем в 2,5 раза по сравнению с серийной.

3. При превышении температуры 860 °С структура материала становится хрупкой, что снижает его механические свойства и делает дальнейшее повышение температуры нецелесообразным.

Список источников

1. Феськов С.А., Иванов Н.А., Старовойтов П.А. Методика определения остаточных размеров изношенных ножей составных лемехов компании "Лемкен" // Вестник Брянской ГСХА. 2024. № 5 (105). С. 40-43.
2. Специфика геометрии износа цельнометаллических лемехов плугов при обработке почв с высокой изнашивающей способностью / А.М. Михальченков, И.В. Козарез, А.В. Пешко, А.Б. Жуков // Вестник Брянской ГСХА. 2019. № 2 (72). С. 60-64.
3. Влияние эпоксидно-песчаных покрытий различных составов на процесс изнашивания, специфику износа и ресурс плужных лемехов / А.М. Михальченков, С.А. Феськов, А.А. Осипов, А.С. Кононенко // Клей. Герметики. Технологии. 2020. № 1. С. 45-48.
4. Козарез И.В., Гуцан А.А., Тюрева А.А. Некоторые особенности методики определения остаточных размеров и линейных износов оставов составных лемехов производства компании "Кун" // Вестник Брянской ГСХА. 2023. № 3 (97). С. 41-45.
5. О некоторых особенностях износов цельнометаллических и составных лемехов (сравнительный анализ) / А.М. Михальченков, А.Г. Силаев, А.В. Рославец, М.А. Михальченкова // Труды инженерно-технологического факультета: сб. многолетних исследований, проводимых кафедрой технического сервиса Брянского ГАУ. Брянск, 2024. С. 89-102.
6. Оценка интенсивности износа различных по геометрической форме рабочих поверхностей лемехов / М.К. Нуриев, К.К. Нуриев, А. Тухтакузиев, Б.Г. Ганиев // Инновационные технологии. 2022. Т. 48, № 4. С. 64-67.
7. Плазменная закалка лемеха плуга из конструкционной стали / А.Т. Канаев, А.А. Гуляренко, П.А. Тополянский, Т.Е. Сарсембаева // Горение и плазмохимия. 2020. Т. 18, № 2. С. 87-93.
8. Михальченков А.М., Гуцан А.А., Синяя Н.В. Влияние двухстороннего наплавочного армирования на твердость термоупрочненной стали 65Г // Технология металлов. 2022. № 6. С. 2-7.
9. Ерохин М.Н., Новиков В.С., Сабуркин Д.А. Выбор марки стали для лемеха плуга // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2008. № 1. С. 5-9.
10. Разработка и технология изготовления почвообрабатывающих рабочих органов / Я.П. Лобачевский, И.В. Лискин, С.А. Сидоров и др. // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2016. № 4. С. 3-8.
11. Исследование физико-механических свойств стали 08х14, 06х14 при нормализации, закалке и различных режимах отпуска / Д.В. Краснов, Р.И. Мукатдаров, В.И. Юршев и др. // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всерос. науч.-метод. конф. Оренбург, 2016. С. 143-145.
12. Liskin I.V., Mironov D.A., Panov A.I. Increasing the durability of ploughshares with wear resistant hard-facing // Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin". 2019. № 1 (89). С. 39-44.
13. Причины предельного состояния составных лемехов импортного производства и их упрочнение наплавочными методами / И.В. Козарез, В.А. Антипин, В.А. Карпухин, А.В. Пилюгайцев // Вестник Брянской ГСХА. 2019. № 5 (75). С. 66-70.
14. Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Миронова А.В. Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023. Т. 17, № 1. С. 41-50.
15. Серёгин Н.Г., Исаев В.Г. Результаты исследования износостойкости конструкционных материалов // Информационно-технологический вестник. 2020. № 2 (24). С. 172-178.

16. Устройство и методика лабораторных испытаний на изнашивание в незакрепленном абразиве образцов из разных материалов и с разными покрытиями / А.М. Михальченков, А.А. Гуцан, А.И. Купреенко, С.А. Феськов // Вестник машиностроения. 2024. Т. 103, № 9. С. 765-768.

17. Муругов А.А. Моделирование структурно-фазовых превращений при сварке высокопрочных трубных сталей с учетом различных вариантов поставки стали // Теория и практика современной науки. 2019. № 7 (49). С. 88-91.

Информация об авторах:

С.А. Феськов - кандидат технических наук, доцент кафедры технического сервиса, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.

И.Н. Кравченко - доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, ИМАШ РАН.

Л.И. Бишутина - старший преподаватель кафедры информатики, информационных систем и технологий.

В.И. Самусенко - кандидат технических наук, доцент кафедры технических систем в агробизнесе, природообустройстве и дорожном строительстве.

Information about the authors:

S.A. Fes'kov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Service, Bryansk State Agrarian University.

I.N. Kravchenko - Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, IMASH RAS.

L.I. Bishutina - Senior Lecturer of the Department of Computer Science, Information Systems, and Technologies.

V.I. Samusenko - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Systems in Agrobusiness, Environmental Management, and Road Construction.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors are responsible for their work and the data provided. All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism. The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 04.03.2025, одобрена после рецензирования 15.05.2025, принята к публикации 25.07.2025.

The article was submitted 04.03.2025, approved after reviewing 15.05.2025, accepted for publication 25.07.2025.

© Феськов С.А., Кравченко И.Н., Бишутина Л.И., Самусенко В.И.