

ЛАЗЕРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТАЛЛОВ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ АГРЕГАТОВ И УЗЛОВ ТЕПЛОВОЗОВ

Д. А. Бирюкова

ассистент кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ФГБОУ ВО ПГУПС)

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема повышения эксплуатационной надежности агрегатов и узлов тепловозов, применением передовых методов структурирования поверхностей деталей для повышения их износостойкости и долговечности. Анализируются как апробированные современные методы модификации металлических поверхностей, включая лазерное упрочнение, легирование, наплавку и термохимическую обработку, так и перспективная технология лазерной маркировки, формирующая особый рельеф поверхности, который способствует созданию благоприятных условий для удержания смазочного материала. В результате уменьшаются потери энергии в узлах трения, повышается их ресурс и эксплуатационная надежность. Внедрение данной технологии позволит существенно повысить эксплуатационные характеристики деталей, снизить износ и увеличить межремонтный интервал, что будет способствовать оптимизации производственных процессов ремонтных предприятий.

Ключевые слова: лазерная модификация поверхностей металлов, лазерная маркировка поверхностей узлов и агрегатов тепловозов, повышение эксплуатационной надежности тепловозов.

В современной локомотивостроительной и локомотиворемонтной отраслях особое внимание уделяется инновационным технологиям обработки поверхностей металлических деталей. Применение передовых методов структурирования позволяет существенно улучшить рабочие характеристики силовых агрегатов локомотивов и повысить экономическую эффективность их эксплуатации.

Выделяют три ключевых направления в области модификации поверхностей, каждое из которых предлагает уникальные технологические решения:

- механическая обработка, которая включает в себя как финишную обработку с помощью режущего инструмента, так и деформационное упрочнение поверхностного слоя; этот метод позволяет добиться необходимых параметров шероховатости и прочности.
- химический метод, основанный на контролируемом травлении поверхности, что обеспечивает формирование требуемого микрорельефа за счет избирательного удаления материала.
- термическая обработка, представляющая собой воздействие высокой температурой для создания специфического микропрофиля поверхности; этот подход особенно эффективен при работе с материалами, чувствительными к химическому воздействию.

Выбор конкретного метода структурирования зависит от множества факторов, основными из которых являются тип обрабатываемого материала, конструктивные особенности детали и требуемые эксплуатационные характеристики.

В ходе механической обработки материалов с помощью режущего инструмента или абразивных частиц происходит формирование специфической поверхности [1]. Резание приводит к удалению микрочастиц различного размера, в результате чего образуются характерные борозды. Интересно, что даже при переходе от грубой обработки к ее финишной стадии микронеровности сохраняют значительное разнообразие своих геометрических характеристик. Особого внимания требуют острые кромки, возникающие в процессе обработки – они негативно влияют на фрикционные свойства и долговечность изделия, поэтому их необходимо скруглять.

Альтернативный подход к структурированию поверхности представляет собой химическое травление с использованием специальных шаблонов [2]. Этот метод демонстрирует высокую эффективность благодаря возможности одновременной обработки всех углублений. Важное преимущество заключается в универсальности применения – технология подходит для материалов различной твердости и изделий сложной конфигурации. Однако практическому внедрению препятствует существенный недостаток – необходимость использования множества дорогостоящих шаблонов для определения оптимальных параметров структуры.

Революционным решением в области модификации поверхностей стало изобретение метода вибронакатывания, автором которого является Ю. Г. Шнейдер [3]. Принцип технологии базируется на контролируемом изменении структуры верхнего слоя металла под воздействием колеблющегося элемента при одновременном поступательном перемещении обрабатываемой детали. На протяжении более двух десятилетий данный метод считался одним из

самых эффективных способов структурирования. Тем не менее, его применение ограничено рядом факторов – так, технология не подходит для работы с хрупкими материалами, тонкими плёнками и кристаллами, а также накладывает ограничения на геометрию обрабатываемых изделий [4].

В современном мире стремительного технологического прогресса возникает острая потребность в инновационных решениях для модификации поверхностей. Это обусловлено постоянно растущими требованиями к эксплуатации различного оборудования. Традиционные методы обработки уже не справляются с новыми вызовами, что побуждает исследователей искать альтернативные подходы к структурированию материалов.

Особенно актуальной эта проблема становится в условиях интенсификации производственных процессов и ужесточения эксплуатационных нагрузок. Машины и аппараты работают в более агрессивных средах, при экстремальных температурах и повышенных нагрузках, что требует принципиально новых решений в области поверхностной обработки.

Разработка современных методов структурирования поверхностей открывает широкие возможности для создания материалов с улучшенными характеристиками износостойкости, трения и коррозионной стойкости. Это становится ключевым фактором в повышении эффективности и долговечности технического оборудования нового поколения.

Одним из инновационных методов является обработка поверхности металлов лазерами. Лазерная обработка позволяет создавать сложные трехмерные структуры с высокой точностью и разрешением. Лазеры могут использоваться для гравировки, маркировки, резки и сварки металлов, а также для изменения их физических и химических свойств.

Лазерная обработка поверхностей металлов обладает рядом преимуществ:

- возможность локального воздействия на поверхность;
- высокая концентрация энергии в ограниченном временном диапазоне;
- отсутствие вредных выбросов;
- возможность обработки в обычных атмосферных условиях;
- транспортировка луча на значительные расстояния [5].

В современном локомотиворемонтном комплексе активно применяются лазерные технологии обработки металлических поверхностей. Эти инновационные технологии успешно используются при ремонте различных агрегатов и узлов (рисунок 1). Основные области применения, их достоинства и недостатки представлены в таблице 1.



Рисунок 1 – Основные технологии лазерной модификации поверхностей

Лазерное упрочнение позволяет значительно повысить износостойкость трущихся поверхностей деталей без изменения их геометрии. Этот метод особенно эффективен при обработке шеек валов, поверхностей качения и других ответственных узлов.

Лазерное легирование обеспечивает насыщение поверхностного слоя металла легирующими элементами, что существенно улучшает эксплуатационные характеристики деталей. Метод широко применяется при ремонте деталей, работающих в условиях интенсивного износа и высоких нагрузок.

Лазерная наплавка позволяет восстанавливать геометрические размеры изношенных деталей с высокой точностью. Этот метод особенно ценен при ремонте дорогостоящих узлов и агрегатов, где восстановление традиционными методами затруднено или экономически нецелесообразно.

Таблица 1 - Технологии лазерного структурирования поверхностей металлов [6]

Технология структурирования	Суть метода	Область применения	Преимущества	Недостатки
Упрочнение	нагрев поверхности до сверхкритических температур с быстрым охлаждением	детали машин, инструменты, узлы трения	повышение износостойкости, минимальное коробление, локальность обработки	высокая стоимость оборудования, требует точного контроля режимов
Легирование	нанесение легирующих элементов на поверхность	износостойкие детали, узлы трения, режущий инструмент	улучшение механических свойств, повышение коррозионной стойкости, улучшение тепловых свойств	сложность контроля качества, возможность образования дефектов, ограничения в обработке
Наплавка	нанесение расплавленного материала на поверхность	восстановление размеров деталей, наложение износостойких покрытий	возможность восстановления изношенных деталей, гибкость процесса, возможность обработки сложных поверхностей	требует точного контроля параметров, высокая стоимость оборудования, необходимость подготовки поверхности
Термохимическая обработка	нанесение покрытий с изменением химического состава поверхности	детали, работающие в агрессивных средах	улучшение коррозионной стойкости, повышение износостойкости, возможность получения специальных свойств	ограничения по глубине обработки, сложность технологического процесса, требования к квалификации персонала

Термохимическая обработка с использованием лазерного излучения обеспечивает формирование защитных покрытий с особыми физико-химическими свойствами. Метод применяется для защиты деталей от коррозии, окисления и других видов поверхностного разрушения [7].

Распределение сферы применения различных технологий в условиях современного локомотиворемонтного производства представлено на рисунке 2.

Методы лазерного структурирования поверхностей металлов

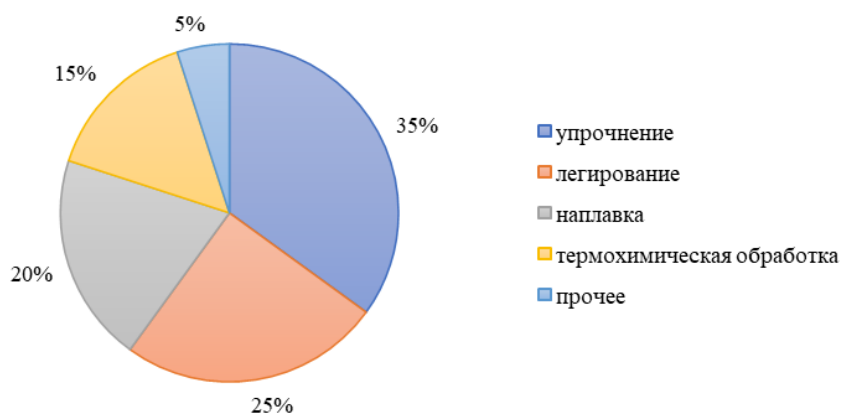


Рисунок 2 – Распределение применения различных технологий лазерной модификации поверхностей

Лазерное упрочнение, легирование и наплавка нашли широкое применение в ремонте локомотивов, а вот термохимическая обработка является одним из инновационных методов. Этот метод позволяет существенно увеличить износостойкость деталей за счет формирования особого микрорельефа и изменения физико-химических свойств поверхностного слоя.

Преимущества термохимической обработки особенно заметны при восстановлении коленчатых валов, шатунов и элементов зубчатых передач. Метод позволяет создавать на поверхности деталей специальные зоны с повышенной твердостью, которые эффективно распределяют нагрузку при трении. При этом глубина модификации составляет 0,1–0,5 мм, что обеспечивает оптимальное сочетание прочности и пластичности материала.

Экономический эффект от внедрения данных технологий достигает 20–30% за счет увеличения ресурса деталей и сокращения времени ремонта. При этом срок службы восстановленных узлов возрастает в 1,5–2 раза по сравнению с традиционными методами ремонта [8].

Помимо широко распространенных методов модификации поверхностей металлов, представляет значительный интерес еще один менее известный, но не менее перспективный метод – лазерная маркировка. Она заключается в воздействии высокоэнергетическим лазерным лучом на поверхность материала, что приводит к его локальному испарению и окислению, существенно изменяя трибологические характеристики материалов. В процессе обработки формируется особый рельеф поверхности, который способствует созданию благоприятных условий для удержания смазочного материала. В результате уменьшаются потери энергии в узлах трения, повышается их ресурс и эксплуатационная надежность.

Основные преимущества микроструктурированного покрытия в контексте снижения трения:

- формирование микрополостей, которые эффективно удерживают смазку и создают гидродинамический эффект;
- уменьшение эффективной площади контакта между трущимися поверхностями;
- изменение характера трения с граничного на смешанный или жидкостный;
- снижение интенсивности износа за счет оптимизации распределения нагрузки.

При этом лазерная обработка позволяет создавать направленные микроканавки и углубления, которые способствуют циркуляции смазочного материала и его равномерному распределению по поверхности трения. Это особенно важно для высоконагруженных узлов тепловоза, таких как коленчатые валы и подшипники.

Экспериментальные данные показывают, что после применения лазерной маркировки коэффициент трения снижается на 20–30%, а ресурс деталей увеличивается в 1,5 – 2 раза. При этом улучшенные антифрикционные свойства сохраняются даже при высоких нагрузках и температурах эксплуатации [9].

Дополнительным преимуществом данной технологии является сохранение механической прочности материала, поскольку модифицируется только поверхностный слой без существенного изменения геометрии детали.

Технологический процесс не требует применения химических реагентов и дополнительных материалов, что делает его экологически безопасным и экономически выгодным. При этом точность позиционирования лазерного луча позволяет работать с деталями сложной конфигурации, не нарушая их геометрических параметров.

Поэтому внедрение микроструктурирования путем лазерной маркировки поверхностей можно рассматривать как один из перспективных методов повышения эксплуатационной надежности агрегатов и узлов тепловозов. Данный метод позволяет существенно продлить срок службы критически важных компонентов локомотива, таких как коленчатые валы, цилиндрические блоки, поршни и элементы трансмиссий.

Особенно важно отметить, что лазерная маркировка не только улучшает характеристики отдельных деталей, но и способствует повышению эффективности работы тепловоза в целом. Это достигается за счет:

- снижения затрат на техническое обслуживание и ремонт;
- уменьшения вероятности аварийных отказов;
- повышения стабильности работы узлов в различных эксплуатационных условиях;

- возможности проведения модернизации существующего парка машин без существенного изменения конструкции.

Применение технологии лазерной маркировки в других отраслях машиностроения показывает, что после обработки ответственных узлов трения вероятность внеплановых ремонтов снижается на 40%, а межремонтный интервал увеличивается на 25–30%. При этом технология совместима с существующей системой планово-предупредительных ремонтов и может быть легко интегрирована в производственный процесс.

В перспективе метод лазерной маркировки может стать стандартным технологическим решением при ремонте и модернизации тепловозного парка, что позволит существенно повысить надежность железнодорожного подвижного состава и снизить эксплуатационные расходы.

Библиографический список

1. Технология механической обработки деталей: учеб. пособие / А.Д. Комаров, Желтов И.Н., Моисеев В.К., Шалавин В.В., Шаров А.А. – Самара : Издательство СГАУ, 2003 . – 60 с.
2. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки // Г.Л. Амитан, И.А. Байсупов, Ю.М. Барон и др.; Под общ. ред. В.А. Волосатова. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 719 с.: ил.
3. Шнейдер Ю.Г. Технология финишной обработки давлением. – СПб.: Политехника, 1998. – 414 с.
4. Вейко Вадим Павлович, Дышлошенко Светлана Сергеевна Лазерное микроструктурирование поверхностей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2001. №4.
5. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
6. Лазерная техника и технология. Методы поверхностной лазерной обработки. А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов – М. Машиностроение. 1985. – 191 с.
7. Коваленко В.С., Головкин Л.Ф., Черненко В.С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера. — К.: Техника, 1990. — 192 с.
8. Мухаммадазим Акбаралиевич Рустамов МЕТОДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС // Scientific progress. 2021.
9. Гнеденков С. В., Синебрюхов С. Л., Хрисанфова О. А., Гордиенко П. С., Вовна В. И., Чередниченко А. И. Антифрикционные свойства покрытий, полученных методом микродугового оксидирования на титане // Исследовано в России. 2002.