

Транспортные системы Transport systems

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.9.048

doi: 10.30987/2782-5957-2025-9-28-37

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ НА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ДЕТАЛЕЙ ТЕЛЕЖЕК ЛОКОМОТИВОВ

Андрей Аркадьевич Жулдыбин¹, Александр Андреевич Владимиров^{2✉}, Антон Иванович Шаповалов³

^{1,2,3} Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», Старый Оскол, Россия

¹ arkad1998@mail.ru

² vladimirov.al.an@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7992-1694>

³ shapowalow130477@yandex.ru

Аннотация

Цель исследования заключается в возможности применения механизированной электроискровой обработки рабочих поверхностей деталей тележек тепловозов, подверженных высокому контактному давлению, истиранию, абразивному изнашиванию.

Задача, решению которой посвящена статья заключается в повышении эксплуатационных характеристик деталей тележек тепловозов методом замены поверхностной термической обработки на поверхностное упрочнение механизированной электроискровой обработкой в защитной среде, с обеспечением характеристик не ниже заданных.

Методы исследования. Теоретический анализ литературных источников по теме формирования электроискровых покрытий на рабочих поверхностях деталей машин, как в ручном режиме, так и механизированным, применяемых электродных материалов, частотно-энергетических режимов легирования, применяемых охлаждающих и защитных газообразных сред и обеспечиваемого в таких условиях упрочнения комплекса свойств: толщины покрытия, микротвердости, шероховатости.

Новизна работы заключается в том, что разработаны комбинации режимов электроискрового легирования, охлаждающей и защитной среды, обеспечивающие формирование на рабочих поверхностях деталей износостойкие покрытия. Практическая значимость состоит в разработке

технологии механизированной электроискровой обработки, которая позволит получать на поверхностях деталей требуемые эксплуатационные характеристики.

Результаты исследования. В результате проведенного теоретического анализа были определены и представлены перспективы применения механизированного электроискрового упрочнения рабочих поверхностей деталей для обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик.

Выводы: одним из перспективных направлений современного машиностроения является разработка технологий восстановления с упрочнением деталей машин и оборудования с целью повышения эксплуатационных характеристик. Особое внимание уделяется перспективам применения механизированной электроискровой обработки в защитных средах газообразного типа. Обосновывается предположение о целесообразности создания комплексной технологии поверхностного упрочнения электроискровым легированием, позволяющей обеспечивать на поверхности детали требуемые эксплуатационные характеристики на рабочих поверхностях деталей машин.

Ключевые слова: электроискровое легирование, тележка, тепловоз, упрочнение, износостойкое покрытие, восстановление, шероховатость, поверхность, микротвердость, сплав, графит.

Ссылка для цитирования:

Жулдыбин А.А. Перспективы применения электроискрового легирования на рабочих поверхностях деталей тележек локомотивов / А.А. Жулдыбин, А.А. Владимиров, А.И. Шаповалов // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 9. – С. 28-37. doi: 10.30987/2782-5957-2025-9-28-37.

PROSPECTS FOR THE USE OF ELECTRIC SPARK ALLOYING ON THE WORKING SURFACES OF LOCOMOTIVE BOGIE PARTS

Andrey Arkadyevich Zhuldybin¹, Aleksandr Andreevich Vladimirov^{2✉}, Anton Ivanovich Shapovalov³

^{1,2,3} Stary Oskol Technological Institute of NUST MISIS, Stary Oskol, Russia

¹ arkad1998@mail.ru

² vladimirov.al.an@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7992-1694>

³ shapowalow130477@yandex.ru

Abstract

The study objective is to explore the possibility of using mechanized electric spark treatment of the working surfaces of diesel locomotive bogies exposed to high contact pressure, abrasion, and abrasive wear.

The task to which the paper is devoted is to improve the performance characteristics of diesel locomotive bogie parts by replacing surface heat treatment with surface hardening by mechanized electric spark treatment in a protective environment, ensuring characteristics not lower than those specified.

Research method include theoretical analysis of literature sources on forming electric spark coatings on the working surfaces of machine parts, both in manual and mechanized mode, applied electrode materials, frequency-energy alloying modes, applied cooling and protective gaseous media and the hardening of properties provided in such conditions: coating thickness, microhardness, roughness.

The novelty of the work is in the fact that combinations of modes of electric spark alloying, cooling and protective media are developed, ensuring the formation of wear-resistant coatings on the working surfaces of parts. The practical significance is in the development of a technology for mechanized electric

spark treatment, which will allow obtaining the required performance characteristics on the surfaces of parts.

Study results. As a result of the theoretical analysis, the prospects for the use of mechanized electric spark hardening of the working surfaces of parts to ensure the required performance characteristics are found and presented.

Conclusions: one of the promising areas of modern mechanical engineering is the development of recovery technologies with hardening of machine and equipment parts in order to improve performance. Special attention is paid to the prospects of using mechanized electric spark treatment in gaseous protective media. The assumption is substantiated about the expediency of creating a complex technology of surface hardening by electric spark alloying, which makes it possible to provide the required performance characteristics on the surface machine parts.

Keywords: electric spark alloying, bogie, diesel locomotive, hardening, wear-resistant coating, restoration, roughness, surface, microhardness, alloy, graphite.

Reference for citing:

Zhuldybin AA, Vladimirov AA, Shapovalov AI. Prospects for the use of electric spark alloying on the working surfaces of locomotive bogie parts. *Transport Engineering*. 2025;9:28-37. doi: 10.30987/2782-5957-2025-9-28-37.

Введение

Условия эксплуатации тепловозов можно разделить на два типа: общие и специфические. Стоит отметить, что к специфическим условиям работы тепловозов относят состояние земляного полотна, температуру, влажность и давление окружающего воздуха, запыленность атмосферы [1].

В большей степени специфические условия работы тепловозов оказывают значительное воздействие на тележки, которые являются основным связующим

элементом между рельсами и рамой тепловоза.

Преимущественно тележки тепловозов предназначены для улучшения условий прохождения кривых участков путей. Тележка является ходовой частью тепловоза, которая непосредственно взаимодействует с рельсовыми путями. Тележкой воспринимается подрессорная масса тепловоза, тяговые и тормозные силы, горизонтальные поперечные усилия при движении по прямым и криволинейным участкам пути. Взаимодействие колесных пар с рельсами

передает через тележки на кузов динамические нагрузки, которые связаны с неровностями пути. Напротив, кузов тепловоза также передает эти силы на путь через тележки. Таким образом, от конструкции тележки и надежности ее элементов зависит плавность хода, динамические качества и ходовые характеристики тепловоза [2].

Исходя из характеристик самого тепловоза и условий его эксплуатации, целесообразно сказать, что условия работы те-

лежек тепловозов и ее деталей можно отнести к тяжелым.

Одними из изнашиваемых элементов тележек тепловозов модели ТГМ4Б и ТЭМ7 являются такие детали, как валик и палец, соответственно. Конструкция тележек предусматривает установку валиков двух типоразмеров, в количестве 20 штук (рис. а) и пальцев двух типоразмеров в количестве 24 штук на тепловоз (рис. б).

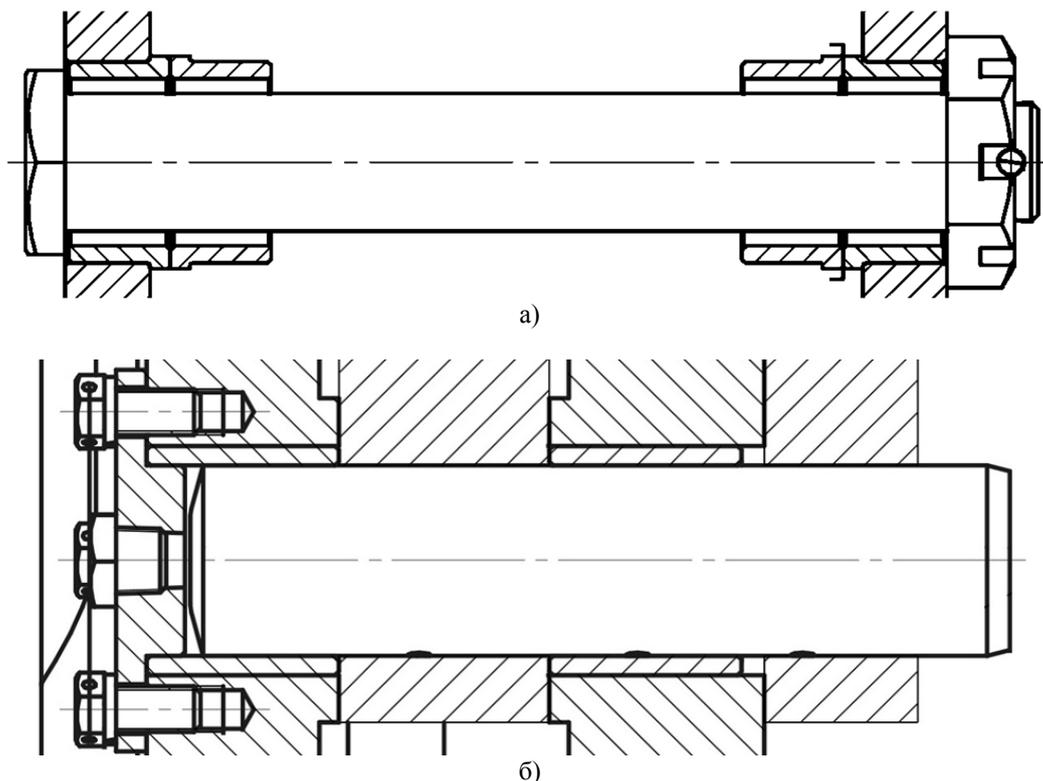


Рис. Детали тележек тепловозов модели ТГМ4Б и ТЭМ7: а – валик; б – палец
 Fig. Details of bogies of diesel locomotives of the TGM4B and TEM7 models: a – roller; b – pin

Валики установлены в узле рессорного подвешивания тележки тепловоза модели ТГМ4Б и предназначены для соединения балансиров и рессор с подвесками. В процессе эксплуатации валики подвергаются ударному воздействию, изгибающим нагрузкам и срезу. Ходимость данных деталей в среднем находится в пределах 3,5 года или 21000 моточасов. Основными дефектами, возникающими в процессе эксплуатации, являются трещины, задиры, сколы и износ поверхностного закаленного слоя.

Пальцы тележки тепловоза модели ТЭМ7 установлены в механизме передачи

силы тяги. Механизм передачи представляет из себя рычажную систему, которая передает усилия, в то же время позволяет двухосной тележке совершать необходимые перемещения относительно промежуточной рамы. В конструкции пальцев по наружной поверхности предусмотрена система отверстий для смазки. В отличие от валиков, пальцы дополнительно подвергаются нагрузкам на кручение. Ходимость данных деталей также находится в пределах 3,5 года или 21000 моточасов. Дефекты такие же, как и у детали валик.

Обобщая условия работы деталей валик и палец, в частности ударное воздей-

ствие, изгибающие нагрузки и нагрузки на кручение, целесообразно отметить, что одним из основных технических требований к деталям является поверхностная термическая обработка на глубину 1...2 мм в диапазоне 42...52 HRC с сохранением вязкости сердцевины. Шероховатость рабочей поверхности при этом должна быть не более 3,2 мкм по параметру Ra.

Анализ литературных источников и постановка проблемы

Одним из методов повышения поверхностной прочности и износостойкости является процесс электроискрового легирования. Метод основан на явлении электрической эрозии и полярного переноса материала электрода на поверхность заготовки при протекании импульсных разрядов в газовой среде.

К достоинствам технологии электроискрового легирования относятся высокая адгезия сформированных покрытий, относительная простота метода и оборудования, высокая экологичность и низкая энергоёмкость процесса. К недостаткам метода, сдерживающим его широкое применение, относятся низкая производительность обработки, высокая шероховатость сформированных покрытий при значительных толщинах упрочнения, ограниченность толщины сформированных покрытий [3, 4, 5].

Спектр материалов, применяемых для электроискрового легирования достаточно широк, что обуславливается условиями эксплуатации деталей в различных условиях.

Известны исследования [6], где авторами рассматривается механизированный процесс электроискрового легирования. Отличительной особенностью механизированной электроискровой обработки было применение вращающегося электрода с частотой вращения 1500 об/мин в контакте с вращающейся упрочняемой деталью на токарном станке. В качестве анода применялись электроды из стали 07X19H11M3Г2Ф, твердого сплава ВК8 и меди. Легирование осуществлялось в среде воздуха. При этом, поток сжатого воздуха с давлением до 4 атм применяли в качестве охлаждающей среды. Сплошность покры-

Основными дефектами, проявляемыми в процессе эксплуатации деталей палец и валик, являются: трещины, задиры, сколы и износ поверхностного закаленного слоя. За исключением трещин, которые возникают в процессе восприятия знакопеременных нагрузок, остальные дефекты связаны с износостойкостью контактной поверхности деталей палец и валик.

тия определялась коэффициентом перекрытия, который напрямую зависел от продольной подачи. В качестве материала подложки применяли сталь 45. В качестве результатов испытаний, полученных в работе образцов, стоит отметить, что покрытия, сформированные электродом из твердого сплава ВК8 при одинаковых технологических параметрах, отличались меньшей толщиной, до 60 мкм, большей микротвердостью до 10,5 ГПа, меньшей шероховатостью 2,2 мкм по параметру Ra и максимальное увеличение износостойкости до 220 % по сравнению со сталью 45.

В диссертации [7] широко исследован вопрос создания износостойких электроискровых покрытий в окислительных и инертных средах. Из основных результатов, касающихся технологии формирования износостойких покрытий электроискровым легированием, можно отметить применяемые технологические газовые среды: кислород, углекислый газ, воздух и аргон. В качестве легирующих электродов в основном применяли твердые сплавы марок ВК6М, ВК8 и Т15К6. Факторами, влияющими на технологические показатели обработки, являлись: напряжение, разрядная емкость конденсаторов, время обработки. Оптимизацию производили по таким параметрам как адгезия и скорость изнашивания покрытия.

Из результатов формирования электроискровых покрытий твердосплавными электродами в технологических газовых средах автором было отмечено, что введение в межэлектродное пространство газовых сред изменяет условия формирования электроискрового покрытия, и, как следствие, оказывает влияние на фазовый состав, физико-механические свойства и

толщину. Так автор указывает, что большая толщина покрытий формируется в среде углекислого газа. Что касается энергии искрового разряда, автором отмечено, что она имеет немонотонный характер, а экстремум наблюдается в области 0,25 Дж, при этом для электрода из Т15К6 была получена наибольшая толщина покрытия 0,78 мкм.

Таким образом, из результатов исследований было установлено, что максимальная сплошность и толщина свойственна покрытиям, полученным в среде углекислого газа, а большая микротвердость достигается в кислороде.

Известны исследования [8, 9] где авторы представили результаты исследований по созданию многокомпонентных металлических и керамических порошковых материалов. Так же авторы отмечают, что перспективными материалами для электроискрового легирования являются твердые сплавы на основе карбида титана и вольфрама. Применение данных марок позволяет увеличить твердость поверхности, повысить износостойкость, тугоплавкость и другие характеристики. Также в работе авторами представлен широкий комплекс исследований по разработке вольфрамсодержащих и безвольфрамовых электродных материалов, их формированию на поверхность образцов и испытанию.

В результате исследований авторы сформулировали вывод о перспективности проведенных исследований для создания электродных материалов для электроискрового легирования, конкретных материалов и их свойств указано не было.

В работе [10] рассматриваются перспективы применения электроискрового легирования для формирования функциональных поверхностных слоев на сталях в различных рабочих средах: воздух, безокислительная атмосфера аргона или водорода. Авторы анализируют основные принципы метода, описывают экспериментальные условия и приводят результаты исследований по модификации стальных поверхностей с целью повышения эксплуатационных свойств. Подробного описания условий формирования электроискро-

вых покрытий в работе не указано. Авторами сформулирован вывод о перспективах применения защитных сред, в частности для упрочнения рабочих поверхностей вырубных штампов, но при этом указано, что микротвердость таких покрытий на 20...25 % ниже, относительно покрытий, сформированных в окислительной среде.

В монографии [11] обобщены теоретические и практические результаты в области электроискрового легирования. Из анализа литературных данных представлены структурированные таблицы по применяемым в электроискровом легировании электродным материалам, применительно к области их эксплуатации. В частности, представляют интерес электродные материалы из карбидовольфрамовых твердых сплавов, электроискровое легирование которыми, обеспечивает следующие характеристики:

- повышение износостойкости;
- повышение коррозионной стойкости;
- повышение жаростойкости;
- повышение стойкости режущего инструмента;
- повышение стойкости штамповой оснастки;
- повышение работоспособности электрических контактов;
- повышение стойкости металлургического оборудования;
- повышение стойкости сельскохозяйственного оборудования.

Широкое применение нашли электроды из таких марок твердых сплавов как ВК8 и Т15К6, который в сочетании с катодом из стали 45 обеспечивают формирование в электроискровом слое повышенных физико-механических характеристик.

Известны исследования [12] где авторами были изучены процессы электроискрового легирования с применением электродов на основе карбида вольфрама для наноструктурирования поверхности стали 35. Авторы отмечают, что формирование тонких наноструктурированных слоев на деталях из конструкционных сталей позволяет существенно повысить их износ- и коррозионную стойкость без дорого-

стоящей термо- или химико-термической обработки. В результате исследований покрытий, сформированных электродом из твердого сплава ВК8 с добавками порошка оксида алюминия авторы сформулировали вывод о перспективности данных электродных материалов, позволяющих улучшить структуру, фазовый состав, микротвердость, эрозию и массоперенос, что в свою очередь формирует на поверхности регулярную полосовую структуру с элементами самоорганизации.

Коллективом автором в работе [13] были проведены обширные исследования электроискрового легирования стальных поверхностей графитом. Представлены результаты исследований электроискровой цементации на сталях 40Х и 12Х18Н10Т как без обработки, так и с безабразивной ультразвуковой финишной обработкой и шлифованием отдельно и в комплексе. Представлены результаты измерений глубины сформированных слоев, микротвердости и шероховатости поверхности. В результате, авторами сформулированы выводы об увеличении толщины упрочненного слоя с увеличением энергии разряда, о поэтапном уменьшении шероховатости поверхности при легировании графитовым электродом, прочностные испытания покрытий показали повышение прочности образцов.

В работе [14] авторами были рассмотрены вопросы поверхностного упрочнения зеркала гидроцилиндра авиационной техники методом электроискрового легирования. В качестве электродных материалов авторы так же отмечают твердосплавные материалы на основе карбидов, керметы, другие металлы и сплавы, графит и другие полупроводниковые материалы. В частности, авторы исследовали упрочнение графитом с последующим алмазным

выглаживанием. В результате авторы сформулировали выводы о перспективности электроискрового легирования графитом с последующим выглаживанием, что позволяет снизить износ стенки цилиндра без изменений действующего технологического процесса изготовления детали.

В работе [15] авторами предложен алгоритм выбора материала электрода, который позволит обеспечить формирование в поверхностном слое метастабильных структур. Исследования основываются на том факте, что применение электродных материалов типа ВК и ТК не позволяет достичь значительного увеличения износостойкости поверхности более чем в 1,5...2 раза. Таким образом, авторы предлагают алгоритм, по которому необходимо выбрать базовый материал электрода, с последующим легированием этим материалом поверхности детали и рядом испытаний. Конкретного материала, обеспечивающего увеличение износостойкости поверхностей деталей авторами не указано.

Известна работа [16], где автор исследовал технологию электроискрового легирования для восстановления и упрочнения режущего инструмента и рабочих поверхностей деталей машин. В качестве электродных материалов автор применял твердые сплавы марок Т15К6, ВК8 и ВК6. Формирование покрытий осуществлялось на образцы из стали 45, которые были предварительно отшлифованы. Исследования производились как в защитной среде, в углекислом газе, так и без нее. Из результатов исследований авторами было установлено, что применение в качестве защитной среды углекислого газа позволило увеличить число наносимых друг на друга слоев покрытия и позволило получить итоговую толщину покрытия до 0,3 мм с плотной и сплошной структурой.

Результаты и обсуждение

В результате проведенного обзора литературных источников стоит отметить, что технология электроискрового легирования является перспективной для упрочнения рабочих поверхностей деталей тепловозов.

Шероховатость покрытий также во многом зависит от состава применяемых электродных материалов, частотно-энергетических режимов и времени обработки, от типа рабочего инструмента, а также исходного рельефа обрабатываемой поверхности.

Снижения шероховатости электроискровых покрытий возможно добиться проведением финишных операций – шлифования (полирования), поверхностного пластического деформирования (ППД) (выглаживания, безабразивной ультразвуковой финишной обработки (БУФО)), притирки, лазерной обработки и т.д.

Большинство из представленных методов финишной обработки не применимы для снижения шероховатости электроискровых покрытий, так как их толщины находятся в диапазоне 0,01-0,05 мм, что меньше или сопоставимо с минимальным технологическим припуском на механическую обработку. Для уменьшения шероховатости упрочненных поверхностей будет перспективным применение поверхностного пластического деформирования выглаживанием с помощью твердосплавного индентора.

В качестве электродного материала перспективным будет применение твердых сплавов марок Т15К6 и ВК8. Дополнительным фактором обеспечения качества упрочнения поверхностного слоя перспективно применение защитной газообразной среды, что будет способствовать защите от окисления и, соответственно, формированию покрытий с высокой степенью чистоты.

В качестве защитных сред было принято решение о применении трех газов: аргон (Ar), углекислый газ (CO₂) и гелий (He). Выбор этих газов обусловлен их применимостью в процессах сварки и наплавки, и некоторых исследованиях электроискрового легирования в защитных средах [17, 18, 19].

Остальные типы газов нецелесообразно применять ввиду их узкого применения для отдельных металлов и сплавов.

Принимая в учет повышение производительности электроискрового легирования, целесообразно рассмотреть применение потока сжатого воздуха с целью охлаждения электрода и обеспечения формирования качества упрочненного слоя.

Обобщая применение различных газообразных защитных сред целесообразно отметить расход с экономическим обоснованием при одном и том же установленном значении давления 0,1 МПа на выходе из сопла:

– аргон – умеренный расход и невысокая стоимость.

– диоксид углерода – расход в 2...2,5 раза выше, чем у аргона, стоимость в 1,5...2 раза ниже, чем у аргона.

– гелий – значительно высокий расход более 10 раз чем у аргона, стоимость в 4...5 раз больше, чем у аргона.

Исходя из вышеизложенного, можно отметить целесообразность применения электроискрового легирования с применением защитной аргоновой среды для поверхностного упрочнения деталей машин и оборудования с целью защиты от трения, коррозии, эрозии, фреттинг-коррозии.

В рамках данного исследования частотно-энергетические режимы будут ограничены параметрами установки для электроискрового легирования ALIER-METAL G53. Таким образом, исходя из условий работы упрочняемых деталей и литературного обзора было принято решение на начальном этапе о легировании на трех режимах, при которых неизменными параметрами будут напряжение $U = 20$ В, сила тока $I = 200$ А, мощность импульсного разряда $P = 4000$ Вт, остальные параметры представлены в таблице.

Таблица

Частотно-энергетические режимы легирования

Table

Frequency-energetic alloying modes

Режим	Длительность τ , мкс	Энергия единичного импульсного разряда E , Дж ($E = P \cdot \tau$)	Частота f , Гц	Суммарная энергия за 1 минуту обработки $\sum E$, кДж·мин ($\sum E = E \cdot f \cdot 60$ сек)
3	100	0,4	400	9,60
5	400	1,6	160	15,36
7	1500	6	40	14,4

Для адекватной оценки сформированного покрытия методом электроискрового легирования и обеспечения износостойкости поверхности деталей палец и валик, в качестве функции отклика в первом приближении были приняты шероховатость упрочненной поверхности, твердость сформированного покрытия и толщина сформированного покрытия.

Дальнейшим направлением исследования электроискрового легирования в защитных средах является проведение серий

Заключение

Таким образом, направлением дальнейших исследований по увеличению эксплуатационного ресурса деталей тележек тепловозов можно выделить следующие направления:

- разработка конструкции и изготовление специального держателя электроискрового вибровозбудителя для токарного станка с подводом защитной газообразной среды в зону легирования;
- исследование и выбор режима электроискрового легирования твердыми

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Технология ремонта тепловозов: Учебник для техникумов ж.-д. трансп. / В.П. Иванов, И.Н. Вождаев, Ю.И. Дьяков, А.Я. Углинский; Под ред. В.П. Иванова. 2-е изд., перераб. И доп. М.: Транспорт, 1987. 336 с.
2. Пойда А.А. Тепловозы: Механическое оборудование: Устройство и ремонт: Учебник для техн. Школ / А.А. Пойда, Н.М. Хуторянский, В.Е. Кононов. М.: Транспорт, 1988. 320 с.: ил., табл.
3. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электроискровая обработка токопроводящих материалов. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 184 с.
4. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электрическая эрозия металлов. М.: Гостехиздат, 1946. (2). 32 с.
5. Лазаренко Н.И. О механизме образования покрытий при электроискровом легировании металлических поверхностей. Электронная обработка материалов. 1965, (1), 49-53.
6. Мулин Ю.И., Ярков Д.В. Особенности образования износостойких покрытий при механизированном процессе электроискрового легирования // Электронная обработка материалов, 2004, № 5, С. 7-13.
7. Коротаяев Д.Н. Создание износостойких покрытий электроискровым легированием в окислительных и инертных средах с оптимизацией режимов и использованием твердосплавных элект-

экспериментов по формированию электроискровых покрытий и последующие их исследования с целью определения доминирующих факторов и функции отклика.

Конфигурация рабочих поверхностей рассматриваемых деталей представляет собой простую геометрическую форму цилиндра, соответственно с целью повышения производительности процесса электроискрового легирования целесообразно механизировать данный процесс.

сплавами марок Т15К6 и ВК8, обеспечивающего необходимую толщину упрочненного слоя;

- исследование и выбор защитной среды, обеспечивающей максимальное качество формирования упрочненного слоя;
- исследование и выбор режимов поверхностного пластического деформирования, обеспечивающего достижение шероховатости легированного слоя не более 3,2 мкм по параметру Ra.

8. Лебедев М. П., Николенко С. В., Верхотуров А. Д., Сюй Н. А. Создание и исследование электродов на основе карбидов вольфрама и титана для механизированного электроискрового легирования // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2014. № 4(21). С. 20-36.
9. Лебедев М. П., Николенко С. В., Верхотуров А. Д., Сюй Н. А. Создание и исследование электродов на основе карбидов вольфрама и титана для механизированного электроискрового легирования // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2015. № 1(22). С. 89-100.
10. Дашкевич В.Г. Возможности электроискрового легирования при создании функциональных слоев на стали / В.Г. Дашкевич, А.В. Ковальчук, И.В. Плетенев // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования: материалы 3-й Республиканской научно-технической конференции молодых ученых, 4-6 ноября 2014 г. Гомель: ИММС НАН Беларуси. С. 30-32.
11. Электродные материалы для электроискрового

легирования с минеральными и самофлюсующимися добавками / С.В. Николенко, Хосен Ри – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. – 305 с.

12. Гадалов В.Н., Гвоздев А.Е., Стариков Н.Е., Романенко Д.Н., Филатов Е.А., Макарова И.А., Ворначева И.В. Применение электроискрового легирования электродными материалами на основе карбида вольфрама для наноструктурирования поверхности стали 35 [Электронный ресурс] // Известия Тульского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2017. № 11-2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-elektroiskrovogo-legirovaniya-elektrodnymi-materialami-na-osnove-karbida-volframa-dlya-nanostrukturirovaniya-poverhnosti> (дата обращения: 02.07.2025).
13. Тарельник В.Б., Паустовский А.В., Ткаченко Ю.Г., Марцинковский В.С., Белоус А.В., Коноплянченко Е.В., Гапонова О.П. Электроискровое легирование графитом стальных поверхностей: технология, свойства, применение // Электронная обработка материалов, 2017, 53(4), 1-10.
14. Денисов Л.В., Бойцов А.Г., Силюнова М.В. Обеспечение эксплуатационных свойств деталей и узлов газотурбинного двигателя локаль-

ным поверхностным легированием // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 2. С. 58-67. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-2-58-67

15. Богданов А.А., Процив В.В., Пацера С.Т., Дербабба В.А. Алгоритм выбора материала электрода при электроискровом легировании деталей. Вісник ХНАДУ, вип. 88, 2020, т. I, с. 113-118.
16. Глушко, С.П. Исследование технологии электроискрового нанесения покрытий, легирования и упрочнения, С.П. Глушко // Advanced Engineering Research. 2021. Т. 21, № 3. С. 253–259. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-3-253-259>
17. Юхин Н.А. Механизованная дуговая сварка плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG) / Н.А. Юхин. М.: СОУЭЛО, 2002. 72 с.
18. Ким В.А., Коротаев Д.Н. Газовая среда – фактор упрочнения при электроискровом легировании // Электронная обработка материалов. Кишинев. 1998. С. 37-43.
19. Коротаев, Д.Н. Влияние газовых сред на технологические возможности электроискрового легирования: дис. канд. техн. наук: 05.02.01 / Коротаев Дмитрий Николаевич. Благовещенск, 1998. 203 с.: ил.

REFERENCES

1. Ivanov VP, Vozhdaev IN, Dyakov YuI, Uglinsky AYa. Technology of diesel locomotives repair: textbook for technical railway transport schools. 2nd ed. Moscow: Transport; 1987.
2. Poida AA, Khutoryansky NM, Kononov VE. Diesel Locomotives: mechanical equipment: arrangement and repair: textbook for technicians. Moscow: Transport; 1988.
3. Lazarenko BR, Lazarenko NI. Electric spark treatment of conductive materials. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1959.
4. Lazarenko BR, Lazarenko NI. Electrical erosion of metals. Moscow: Gostekhizdat; 1946.
5. Lazarenko NI. On the mechanism of coating formation during electric spark alloying of metal surfaces. Electronic Processing of Materials. 1965;1:49-53.
6. Mulin YuI, Yarkov DV. Features of forming wear-resistant coatings during a mechanized process of electric spark alloying. Electronic Processing of Materials. 2004;5:7-13.
7. Korotaev DN. Creation of wear-resistant coatings by electric spark alloying in oxidizing and inert media with optimization of modes and use of carbide electrodes [dissertation]. [Omsk (RF)]: 2009.
8. Lebedev MP, Nikolenko SV, Verkhoturov AD, Suy NA. Creation and study of electrodes based on tungsten and titanium carbides for mechanized electric spark alloying. Vestnik Inzhenernoi shkoly DVFU, FEFU: School of Engineering Bulletin.

2014; 4(21):20-36.

9. Lebedev MP, Nikolenko SV, Verkhoturov AD, Suy NA. Creation and study of electrodes based on tungsten and titanium carbides for mechanized electric spark alloying. Vestnik Inzhenernoi shkoly DVFU, FEFU: School of Engineering Bulletin. 2015;1(22):89-100.
10. Dashkevich VG, Kovalchuk AV, Pletenev IV. Possibilities of electric spark alloying when creating functional layers on steel. Proceedings of the 3rd Republican Scientific and Technical Conference of Young Scientists, November 4-6, 2014: New Functional Materials, Modern Technologies and Research Methods; Gomel: IMS NAS of Belarus; 2014. p. 30-32.
11. Nikolenko SV, Khosen Ri. Electrode materials for electric spark alloying with mineral and self-fluxing additives. Khabarovsk: Publishing House of the Pacific State University; 2015.
12. Gadalov VN, Gvozdev AE, Starikov NE, Romanenko DN, Filatov EA, Makarova IA, Vornacheva IV. Application of electroscribe deposition with electrode materials based on tungsten carbide for nanostructuring the surface of steel 35. Izvestiya Tula State University. Technical Sciences [Internet]. 2017;11-2 [cited 2025 Febr 07]. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-elektroiskrovogo-legirovaniya-elektrodnymi-materialami-na-osnove-karbida-volframa-dlya-nanostrukturirovaniya-poverhnosti>.
13. Tarelnik VB, Paustovsky AV, Tkachenko YuG,

- Martsinkovsky VS, Belous AV, Konoplyanchenko EV, Gaponova OP. Electric spark graphite alloying of steel surfaces: technology, properties, application. *Electronic Processing of Materials*. 2017;53(4):1-10.
14. Denisov LV, Boytsov AG, Siluyanov MV. Assuring performance characteristics of gas-turbine engine parts and assemblies using electrosark doping. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018;17(2):58-67. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-2-58-67
15. Bogdanov AA, Protsiv VV, Patsera ST, Derbaba VA. Algorithm for choosing the electrode material during electric spark alloying of parts. *Bulletin of Kharkov national Automobile and Highway University*. 2020;88(I):113-118.

16. Glushko SP. Investigation of the electrosark coating, alloying and strengthening. *Advanced Engineering Research [Internet]*. 2021;21(3):253-259. Available from: <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-3-253-259>.
17. Yukhin NA. Mechanized arc welding with a melting electrode in protective gases (MIG/MAG). Moscow: SOWELO; 2002.
18. Kim VA, Korotaev DN. Gas medium is a hardening factor in electrosark alloying. Chisinau: Electronaya Obrabotka Materialov; 1998.
19. Korotaev DN. Influence of gas media on the technological capabilities of electrosark alloying [dissertation]. [Blagoveshchensk (RF)]; 1998.

Информация об авторах:

Жулдыбин Андрей Аркадьевич – аспирант кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта, тел. +79124821236.

Владимиров Александр Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта, международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 57214578618,

Zhuldybin Andrey Arkadyevich – Postgraduate Student at the Department of Technology and Equipment in Metallurgy and Mechanical Engineering named after V.B. Krakht, phone: +79124821236.

Vladimirov Aleksander Andreevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment in Metallurgy and Mechanical Engineering named after V.B. Krakht;

Research- ID-Web of Science AAW-8223-2020, Author-ID-РИНЦ 818516, тел. +79205605185.

Шаповалов Антон Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта, международные идентификационные номера автора: Author-ID-РИНЦ 477668, тел. +79038843784.

Scopus-Author ID 57214578618, Research-ID-Web of Science AAW-8223-2020, Author-ID-RSCI 818516, phone: +79205605185.

Shapovalov Anton Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment in Metallurgy and Machine Building named after V.B. Krakht; Author-ID-RSCI 477668, phone: +79038843784.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 11.07.2025; одобрена после рецензирования 15.07.2025; принята к публикации 30.04.2025. Рецензент – Сьянов С.Ю., кандидат технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, заместитель главного редактора журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 11.07.2025; approved after review on 15.07.2025; accepted for publication on 28.08.2025. The reviewer is Syanov S.Yu., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, Deputy Editor-in-Chief of the journal *Transport Engineering*.