

На правах рукописи



Олефиренко Никита Андреевич

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ ИЗ СТАЛИ 45 ПОСЛЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ**

Специальность: 2.6.17 – Материаловедение (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский политехнический университет» («Московский Политех») на кафедре «Материаловедение»

Научный руководитель: - доктор технических наук, профессор
Овчинников Виктор Васильевич

Официальные оппоненты: **Шиганов Игорь Николаевич**
- доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», профессор

Быценко Оксана Анатольевна
- кандидат технических наук, АО «Московское машиностроительное предприятие имени В.В. Чернышева», ведущий специалист

Ведущая организация: - федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет»

Защита диссертации состоится «23» декабря 2021 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.04 (Д 212.125.15) в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д. 3, ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Скворцовой Светлане Владимировне и по электронной почте skvorcovasv@mai.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте: https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=160648

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Скворцова С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Рост численности подвижного состава железнодорожного транспорта вызывает необходимость наращивания объемов поставок запасных частей, а это требует дополнительных материальных и трудовых ресурсов на их изготовление.

Важнейшим резервом повышения эффективности использования подвижного состава железнодорожного транспорта является восстановление изношенных деталей, позволяющее повторно, иногда и многократно, использовать исчерпавшие ресурс детали и узлы.

Одной из наиболее многочисленных групп восстанавливаемых деталей являются различного типа валы, точнее – изношенные шейки валов. В системе кондиционирования воздуха салона пассажирского вагона это коленчатые валы компрессора фреона.

Для восстановления изношенных шеек коленчатых валов используется электродуговая металлизация. Данный процесс отличается высокой производительностью по массе напыляемого материала. К недостаткам процесса следует отнести большую неоднородность напыляемых частиц по размеру, ограниченные по сравнению с другими газотермическими способами напыления возможности выбора материалов для напыления и соответственно более узкий диапазон регулирования свойств покрытий по плотности и прочности. Фактором, определяющим качество восстановления деталей, является прочность сцепления (адгезия) напыленного слоя покрытия с подложкой.

Анализ литературы, а также последние достижения в машиностроении, свидетельствуют о том, что наиболее перспективными методами повышения ресурса высоконагруженных деталей машин являются вакуумные ионно-плазменные технологии высоких энергий. Обработка поверхности металлов и сплавов ионными пучками существенно изменяет физико-механические, химические свойства и структуру поверхностного слоя. Имплантация поверхностей сталей ионами различных газов и металлов позволяет управлять химическим и фазовым составом приповерхностных слоев различных изделий, т.е. проводить легирование сталей различными элементами в количествах, которые не всегда достижимы традиционными методами.

В этой связи, актуальным становится исследование влияния ионной имплантации на физико-механические свойства напыленного слоя стали 45 после электродуговой металлизации.

Актуальность темы диссертации подтверждается также тем, что ее базовую основу составляют исследования, выполненные автором в рамках Государственного контракта на выполнение работ для государственных нужд Российской Федерации 14.В37.21.1846 «Разработка научных основ технологии полиионной имплантации ремонтных коленчатых валов из конструкционной стали, восстановленных электродуговой металлизацией».

Степень разработанности темы. Большой вклад в решение проблемы повышения износостойкости титановых сплавов за счет обработки поверхностного слоя внесли ученые Шаркеев Ю.П., Смыслов А.М., Щипачев А.М., Крит Б.Л., Борисов А.П., Ковалевская Ж.Г., Тетельбаум Д.И., Molinari A., Straffelini T.V., Rack H.J. и др.

Целью диссертационной работы является повышение износостойкости шеек коленчатых валов из стали 45, восстановленных электродуговой металлизацией, за счет микролегирования поверхностных слоев при полиионной имплантации.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Установить влияние химического состава электродной проволоки и параметров режима металлизации на структуру покрытия и величину адгезии напыленного слоя к подложке.

2. Изучить влияние технологии подготовки поверхности подложки на прочность сцепления с ней напыленного покрытия и пористость слоя покрытия.

3. Определить трибологические характеристики образцов стали 45 после электродуговой металлизации проволоками разного химического состава.

4. Определить влияние имплантации на физико-механические и трибологические свойства стали 45 и обосновать выбор сорта имплантируемых ионов.

5. Определить рациональный химический состав материала катода имплантера и параметры режима имплантации, обеспечивающие наиболее высокую износостойкость облученных образцов.

6. Исследовать влияние микролегирования при полиионной имплантации на структуру и весовой износ напыленного покрытия.

7. Разработать рекомендации по повышению износостойкости шеек коленчатого вала из стали 45, восстановленных электродуговой металлизацией, путем полиионной имплантации.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Установлено, что прочность сцепления напыленного слоя с подложкой определяется химическим составом электродной проволоки и наличием окисления поверхности подложки и напыляемых частиц в процессе металлизации. Для устранения окисления предложено аэрозольное флюсование с введением в транспортирующий газовый поток и дуговой промежуток флюса в виде водного раствора Na_2CO_3 с концентрацией 30–60 г/л и расходом 5–10 мл/мин.

2. Показано, что увеличение скорости транспортирующего газового потока со 155 до 355–520 м/с способствует уменьшению размера напыляемых частиц с 90–105 до 30–60 мкм и увеличение прочности сцепления покрытия с подложкой до 50,5–53,1 МПа при открытой пористости 2,5–3,7%.

3. Показано, что снижение износа при трении в 5,5–6 раз наблюдается при имплантации ионами титана и сплава Cu-Pb с флюенсом в диапазоне $5 \cdot 10^{16}$ – $3,2 \cdot 10^{17}$ см⁻². Увеличение флюенса свыше $5 \cdot 10^{17}$ см⁻² сопровождается снижением износостойкости имплантированного покрытия за счет образованием кластеров обогащенных внедряемыми элементами, интерметаллидных соединений а также существенной фрагментацией структуры поверхностного слоя на наноуровне.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Полученные покрытия могут быть использованы для восстановления и упрочнения рабочих поверхностей изделий из сталей, эксплуатирующихся в условиях трения.

2. Разработан и опробован процесс упрочнения и восстановления рабочих поверхностей коленчатых валов компрессора фреона системы кондиционирования воздуха в пассажирском железнодорожном вагоне. Разработано оборудование для проведения реновации коленчатых валов компрессора фреона с контролем геометрических параметров нанесения покрытия.

3. Разработанный технологический процесс был применен для обработки рабочих поверхностей коленчатых валов компрессоров фреона как не эксплуатирувавшихся, так и после реновации с целью повышения срока их эксплуатации. Проведенные стендовые испытания восстановленных

коленчатых валов компрессора фреона показали, что использование ионной имплантации покрытия, полученного электродуговой металлизацией, позволяет продлить срок гарантированной эксплуатации указанных валов до 8 лет.

4. Результаты работы были внедрены в учебно-образовательный процесс подготовки бакалавров и магистров по направлениям 22.03.01 и 22.04.01 "Материаловедение и технологии материалов".

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследований влияния аэрозольного флюсования на повышение прочности сцепления покрытия с подложкой.

2. Экспериментально обоснованные режимы электродуговой металлизации, обеспечивающие получение износостойких покрытий с коэффициентом пористости не превышающем 6–12%.

3. Закономерности изменения структуры имплантированного слоя, весового износа и коэффициента трения стали 45 и газотермического покрытия на основе стали 50ХФА после имплантации ионами титана и сплава Cu–Pb–Sn.

4. Результаты влияния микролегирования при имплантации ионами титана и сплава Cu–Pb–Sn на структуру, механические и эксплуатационные свойства слоя покрытия на основе стали 50ХФА.

Методы исследования и достоверность полученных результатов.

Методологической основой исследования послужили работы ведущих российских и зарубежных ученых, государственные стандарты РФ.

Результаты экспериментальных исследований получены с использованием современных методов исследования структуры и свойств материалов, а также сертифицированного испытательного оборудования. Показана воспроизводимость результатов.

Реализация результатов работы.

Результаты диссертационной работы внедрены в серийный технологический процесс реновации коленчатых валов компрессора системы кондиционирования воздуха в пассажирском вагоне. Результаты диссертационной работы использованы при выполнении исследований по Государственному контракту на выполнение работ для государственных нужд Российской Федерации 14.В37.21.1846 «Разработка научных основ технологии полиионной имплантации ремонтных коленчатых валов из конструкционной стали, восстановленных электродуговой металлизацией».

Степень достоверности результатов.

Все результаты получены на современном оборудовании с использованием лицензионного программного обеспечения. Стандартные испытания и исследования проводились в соответствии с требованиями научно-технической документации, действующей на территории Российской Федерации (ГОСТ и ISO). Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации подтверждены теоретическими решениями и экспериментальными данными.

Апробация работы.

Результаты работы доложены и обсуждены на четырех научно-практических конференциях, в том числе: 14-я Международная научно-практическая конференция «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика» в секции «Технологии упрочнения и восстановления физико-механических свойств поверхности» (Санкт-Петербург, 17-20 апреля 2012 г.); Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в машиностроении: проблемы, задачи, решения» (Орск, 15-17 января 2012 г.); 1-я Всероссийская научно-техническая конференция «Современная техника и технологии: Проблемы, состояние, перспективы» (Рубцовск, 2011 г.); 2-я Международная научно-практическая конференция "Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов" (Курск, 2021 г.).

Личный вклад автора состоит в его непосредственном и активном участии в формировании цели и задач исследования, в проведении теоретических и экспериментальных исследований, анализе и обработке полученных результатов, их обобщении, формулировке рекомендаций и выводов по диссертации, а также написании публикаций в журналах и докладов на научных конференциях.

Публикации: основное содержание диссертации отражено в 12 научных работах, в том числе в 5 статьях в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ. Получен патент РФ на полезную модель №139509 «Коленчатый вал».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы (158 наименований) и содержит 212 страниц машинописного текста, в том числе 88 рисунков, 18 таблиц и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В главе 1 представлен обзор отечественных и зарубежных работ о состоянии и перспективах развития газотермического напыления при выполнении работ по реновации различных деталей.

Общим для всех методов газотермического напыления является то, что исходный напыляемый материал нагревается до плавления (или пластифицируется) и ускоренно транспортируется в высокотемпературном потоке газа на напыляемую поверхность, различным является источник нагрева напыляемого материала.

На основе анализа технологических преимуществ и недостатков различных методов газотермического напыления, а также затрат на его применение в серийном ремонтном производстве для восстановления изношенных коленчатых валов компрессоров фреона, был выбран метод электродуговой металлизации.

Несмотря на обширный объем выполненных исследований по электродуговой металлизации, остаются до конца нерешенными проблемы – скорость и окисление диспергированного металла в гетерофазном потоке.

Для решения проблемы снижения отрицательного влияния окисления необходимо провести исследования, связанные с увеличением скорости потока напыляемых частиц на выходе из металлизатора, модернизация металлизатора с использованием металлокарботермических процессов и исследование влияния состава электродной проволоки на свойства покрытия при напылении на сталь 45.

Повышение сопротивления детали изнашиванию при различных видах эксплуатационного нагружения может быть достигнуто технологическими методами объемного или поверхностного упрочнения. Однако большинство деталей работает в условиях, при которых эксплуатационная нагрузка (давление, нагрев, действие окружающей среды) воспринимается главным образом их поверхностным слоем. Поэтому износостойкость, коэффициент трения зависят от сопротивления поверхностного слоя разрушению. Для деталей, разрушение которых начинается с поверхности, разработано большое количество методов поверхностного упрочнения, основанных на нанесении покрытий или изменения состояния (модификации) поверхности.

Модифицирование поверхностного слоя может осуществляться деформационным упрочнением, поверхностной термообработкой, диффузионным нанесением легирующих элементов, воздействием на поверхность лазерными, электронными и ионными пучками.

Одним из перспективных методов по созданию износостойких, антифрикционных свойств поверхности деталей является ионная имплантация.

Целенаправленный выбор сорта ионов и режимов ионного облучения позволяет создать на поверхности сталей слои с низким коэффициентом трения и износа.

На основании выполненного обзора были сформулированы цель и задачи исследования.

В главе 2 приведено описание оборудования для электродуговой металлизации коленчатых валов компрессоров фреона при их восстановлении.

Для металлизации использовался стационарный металлатор ЭДМ-5М. Нанесение слоя покрытия производится во вращателе (токарном станке), обеспечивающим равномерное вращение детали со скоростью 40–150 об/мин и продольное перемещение металлатора вдоль напыляемой детали со скоростью 80–120 мм/мин.

Для металлизации в зависимости от условий работы и необходимой твердости наносимого слоя покрытия, используемой проволоки диаметром 1,6–2,0 мм марок 12Х13, 12Х18Н10Т, 40Х13, Св.08ГА, ПТТП-1, 20Х13, 50ХФА, 15ГСТЮЦА, Х20Н80, 30ХГСА, Х15Н60 и др.

Определение прочности сцепления покрытия с подложкой определяли по штифтовому методу. Сущность метода заключается в определении величины разрушающей нагрузки при вытягивании штифта усилием, направленным по нормали к торцовой плоскости штифта, на которую нанесено покрытие.

Твердость покрытия определялась по методу Роквелла (ГОСТ 9013–59).

Износостойкость газотермического покрытия до и после ионной имплантации определялась по действующей методике сравнительной оценки триботехнических характеристик (линейный и весовой износ, коэффициент трения, интенсивность изнашивания) стали и сплавов при сухом трении.

Весовой и линейный износ определяется как среднеарифметическое: для одноименных покрытий – по общему количеству образцов, а для

разноименных покрытий – отдельно для каждого покрытия по количеству образцов в серии.

Металлографический анализ структуры напыленных слоев проводился с помощью оптической микроскопии при увеличении от $\times 100$ до $\times 500$ раз. Применялся оптический металлографический микроскоп «Carl Zeiss».

Наиболее перспективными ионными источниками для обработки металлических конструкционных материалов, где требуются высокие дозы облучения при средних энергиях, являются источники на основе вакуумной дуги, которые работают в частотно-импульсном режиме и обеспечивают высокую производительность. Такие источники позволяют генерировать ионные пучки с высокой плотностью ионного тока и обеспечивать многоэлементную, высокодозовую имплантацию. Имплантацию образцов и опытной партии коленчатых валов фреона выполняли на экспериментальной установке, а также на промышленной установке "ДИАНА".

В качестве материала катода использовались титановый сплав ВТ1-0, ниобий и монотектический сплав, содержащий 64% меди и 36 % свинца, с дополнительным контактным легированием оловом.

Для исследования тонких структур напыленных слоев после ионной имплантации в работе применялся электронный сканирующий микроскоп марки Evo-50 фирмы «Carl Zeiss» и метод вторичной ионной масс-спектрометрии. Концентрационные профили элементов исследовались в центре коллективного пользования «Металловедение и металлургия» НИТУ МИСиС на установке «Physical Electronics» PHI-6600 SIMS System.

Исследование нанотвердости H и модуля упругости E проводили с помощью нанотвердомера Nano Hardness Tester NHT, CSM.

Изучение тонкой структуры образцов проводилось с помощью просвечивающей микроскопии на оборудовании компании «Системы для микроскопии и анализа». Для просвечивающей дифракционной электронной микроскопии использовался многоцелевой электронный микроскоп Теснаі G2 20 ПЭМ.

Рентгеноструктурные исследования осуществлялись с помощью дифрактометра ARL XTRA (Швейцария), представляющего собой полноразмерный порошковый дифрактометр θ - θ геометрии с радиусом гониометра 260 мм и источником – узкофокусной трубкой мощностью 2200 Вт с медным анодом ($\lambda_{K\alpha} = 1,5418 \text{ \AA}$).

В исследованиях применялась машина трения, Tribometer, CSM Instruments, Швейцария. Данная машина трения реализует следующие

испытательные схемы: «стержень–диск», «стержень–пластина», «стержень–штулка». Эти испытания соответствуют международным стандартам ASTM G99–959, DIN50324 и ISO 20808.

В главе 3 представлены результаты исследования влияния химического состава электродной проволоки, способа подготовки поверхности подложки и параметров электродуговой металлизации на структуру и свойства напыленных покрытий.

На основе применения штифтового метода была исследована прочность сцепления (адгезионная прочность) покрытия с подложкой из стали 45. Установлено, что величина адгезионной прочности варьируется в диапазоне от 17,5 до 23,5 МПа в зависимости от марки электродной проволоки при напылении на гладкую поверхность. Наиболее высокой прочностью сцепления с подложкой обладает покрытие, напыленное проволоками марок X20H80, 08ГА, 50ХФА, 40Х13 и 15ГСТЮЦА.

Результаты экспериментов показали, что при расстоянии между срезом сопла металлатора и напыляемой подложкой более 160 мм наблюдается заметное снижение прочности сцепления покрытия с подложкой вследствие окисления подложки в процессе напыления и нарушением связи между подложкой и напыленным покрытием.

Проведено исследование влияния количества проходов при напылении на глубину слоя, подвергающегося тепловому воздействию со стороны потока напыляемых частиц. Так после второго прохода ширина зоны пониженной микротвердости подложки возросла до 0,45–0,48 мм, а после третьего прохода указанная ширина стабилизируется на уровне 0,50–0,53 мм.

Результаты измерений свидетельствовали о том, что наиболее высокие значения твердости напыленного слоя достигаются при использовании электродных проволок марок 40Х13, 20Х13 и 50ХФА (Рисунок 1).

Участки образцов, на которых металлографическим анализом было установлено отслоение покрытия от подложки подвергались исследованию на сканирующем электронном микроскопе, оснащенный модулем для определения химического состава поверхности подложки в зоне отслоения напыленного слоя (Рисунок 2).

Прочность сцепления покрытия с подложкой в большой степени зависит от технологии подготовки поверхности подложки к металлизации. Из исследованных способов подготовки поверхности подложки наиболее эффективным является зачистка абразивными кругами и ультразвуковая обработка.

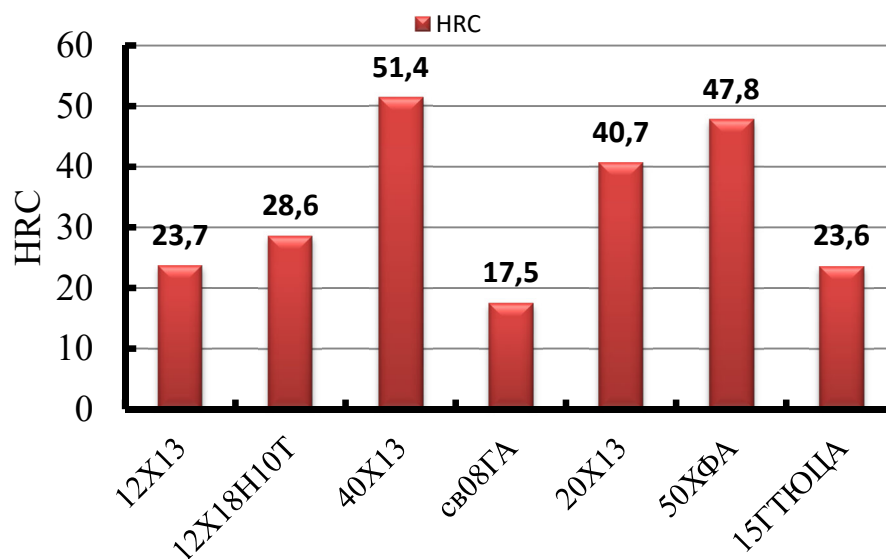


Рисунок 1. Влияние марки электродной проволоки на твердость напыленного слоя

Металлографический анализ и гидростатическое взвешивание образцов напыленного покрытия показали, что в покрытии наблюдается развития открытая пористость, уровень которой варьируется в диапазоне 5,56–19,71%.

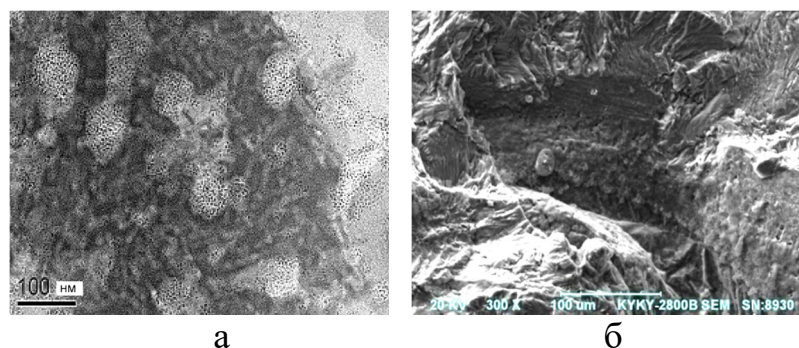
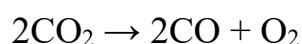
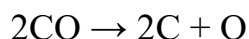
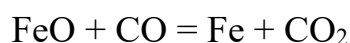


Рисунок 2. Электронно-микроскопические изображения оксида железа на поверхности подложки в зоне отслоения напыленного покрытия

Для уменьшения отрицательного влияния окисления подложки в процессе металлизации в факел диспергированной электродной проволоки вводился аэрозоль, который представлял собой водный раствор карбоната натрия.

Попадая в зону высокой температуры электрической дуги и факела диспергированного металла, предварительно диссоциированный карбонат натрия подвергается дальнейшей термической диссоциации.





Далее, контактируя с расплавленным железом, образуются твердые фазы: $\text{Fe} + \text{C} \rightarrow \text{FeC}$ (цементит) и $2\text{Fe} + \text{C} \rightarrow \text{Fe}_2\text{C}$ (карбид). Таким образом, в процессе аэрозольного флюсования протекает карботермический процесс и наблюдается упрочнение железа.

Для экспериментальных исследований по аэрозольному флюсованию использовали гидродиспергатор, представляющий собой стальной цилиндр, в котором с помощью сжатого воздуха диспергируется (измельчается до туманного состояния) водный раствор флюса; гетерофазный поток направляется в электрическую дугу металлатора, где и происходит диссоциация раствора и другие фазовые превращения.

Максимальная адгезионная прочность 55–57 МПа получена при использовании в качестве аэрозольного флюса гидрид алюминат лития (LiAlH_4). Металлографические исследования покрытий, полученных с аэрозольным флюсованием, показали отсутствие дефектов в пределах напыленного слоя (Рисунок 3).

Результаты исследований свойств покрытий в зависимости от скорости истечения транспортирующей газовой струи из распылительной головки приведены в Таблице 1.

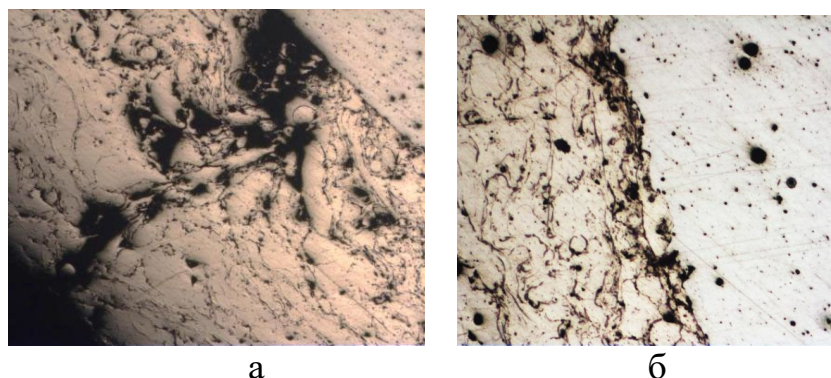


Рисунок 3. Микроструктура покрытия, полученного металлизацией без (а) и с аэрозольным флюсованием (б) (x200)

Таблица 1

**Зависимость свойств покрытий от скорости истечения воздуха
(проволока 40X13)**

Свойства покрытия	Расчетная скорость истечения воздуха из сопла, м/с		
	230	372	520
Твердость, HRC	50,6	53,0	50,0
Адгезия, МПа	29,6	34,8	40,3
Пористость, %	12,1	6,9	3,9

Увеличение скорости транспортирующего газового потока со 155 до 355–520 м/с способствует уменьшению размера напыляемых частиц до 30–60 мкм и увеличению прочности сцепления покрытия с подложкой до 50,5–53,1 МПа при открытой пористости 2,5–3,7%.

Из микроструктурного анализа (Рисунок 4) видно, что при низких скоростях истечения воздуха микроструктура покрытия крупнозернистая, с большим количеством пор. По мере увеличения скорости истечения воздуха, покрытия имеют все более тонкую микроструктуру и суммарный объем пор уменьшается.

При испытаниях на износостойкость установлено, что в условиях трения без смазки наиболее низкий линейный износ показали образцы, напыленные электродными проволоками 40Х13 и 50ХФА, который составил 46,8 и 56,2 мкм соответственно.

В главе 4 приведены результаты исследований влияния ионной имплантации на механические и трибологические свойства стали 45, а также газотермических покрытий, нанесенных на упомянутую сталь электродуговой металлизацией с использованием электродной проволоки 50ХФА.

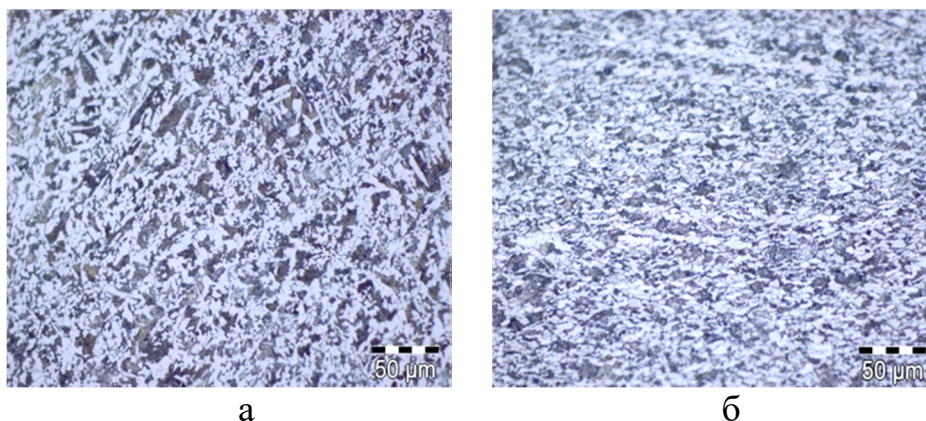


Рисунок 4. Микроструктура напыленного покрытия при скорости транспортирующего газового потока 135 м/с (а) и 520 м/с (б)

С помощью пакета программ для классической молекулярной динамики LAMMPS выполнено моделирование процесса проникания ионов меди в мишень из железа и рассчитано распределение внедренной примеси по мере удаления от поверхности мишени. Моделирование показало, что на расстоянии от поверхности мишени порядка 130–150 нм наблюдается пик концентрации внедренных ионов меди, после чего концентрация ионов меди постепенно снижается практически до нуля. Расчетная толщина ионно-легированного слоя для флюенса облучения 10^{18} см⁻² составляет 450–520 нм.

С помощью Оже-спектрометрии исследована глубина проникания ионов меди и свинца при имплантации в сталь 45 и слой газотермического покрытия на основе электродной проволоки 50ХФА. Исследования проводились при значениях флюенса имплантации 10^{17} , $5 \cdot 10^{17}$ и 10^{18} см⁻².

Результаты экспериментов показали, что при одинаковых условиях имплантации глубина проникания ионов меди и свинца в слой газотермического покрытия превышает на 28–45% глубину проникания ионов в мишень из стали 45.

Структуру и фазовый состав имплантированных образцов исследовали методом просвечивающей электронной микроскопии. Результаты исследований фольг, приготовленных из поверхностного слоя напыленного покрытия 50ХФА, показали, что в результате многоэлементной имплантации в имплантированном слое формируются сложные, многослойные структуры.

В структуре поверхностного слоя наблюдается фрагментация структуры с образованием кластеров обогащенных атомами свинца и олова, что подтверждается данными электронограмм и характером абсорбционного контраста (Рисунок 5).

Темные кластеры наблюдаются на светлом фоне. Такой абсорбционный контраст показывает, что окружающий их объем, содержит более легкий элемент, в нашем случае это медь.

Обращает на себя внимание образование в структуре светлой полосы, толщиной 25–50 нм. Дифракционный анализ и темнопольная микроскопия позволяют сделать вывод, что данная область носит ярко выраженный фрагментированный характер. Области между фрагментами носят сильно разупорядоченный характер, т.о. этот внутриграницный объем можно считать объемом аморфного состояния.

На снимке высокого разрешения, снятого с полосы, видно, что данная зона имеет ультра мелкокристаллическую структуру с присутствием небольшого объема ~10% аморфной составляющей (Рисунок 6).

Ионно-легированный слой напыленного покрытия имеет структуру речного мартенсита с развитой дислокационной структурой. При этом дислокации распределены неравномерно, встречаются места с большой плотностью дислокаций.

Анализ приведенной структуры позволяет сделать вывод, что в результате полиионной имплантации поверхности напыленного покрытия на основе стали 50ХФА ионами меди и свинца в тонком поверхностном слое происходят значительные концентрационные изменения, с образованием

кластеров обогащенных внедряемыми элементами, а также наблюдается существенная фрагментация структуры на наноуровне.

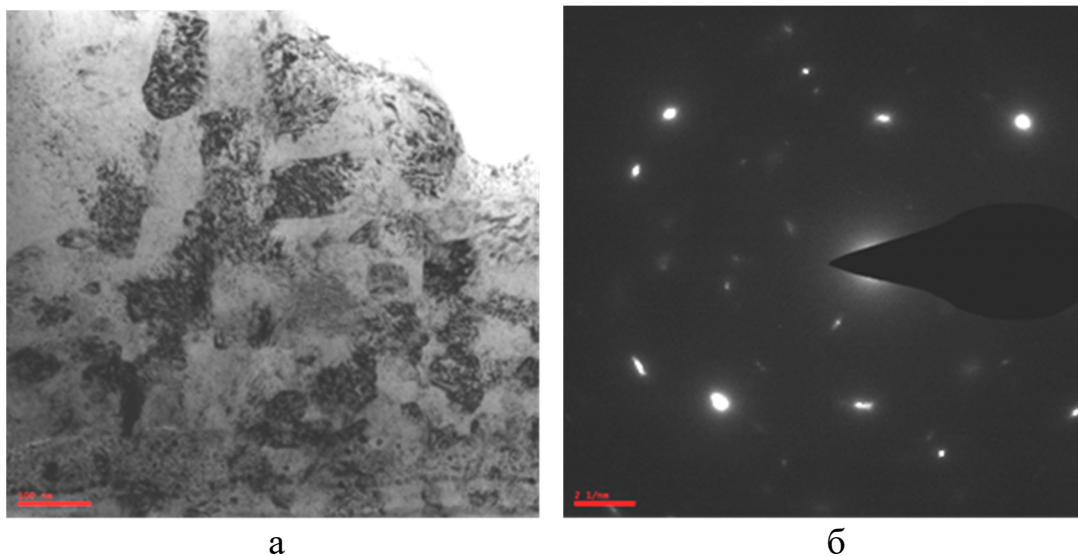


Рисунок 5. Микроструктура (а) и картина микродифракции (б) поверхности (масштабная линейка = 100 нм)

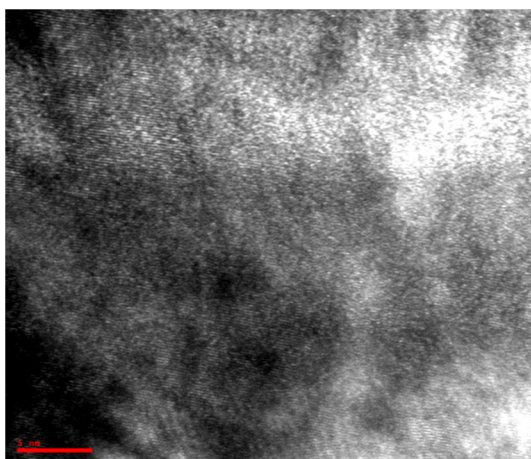


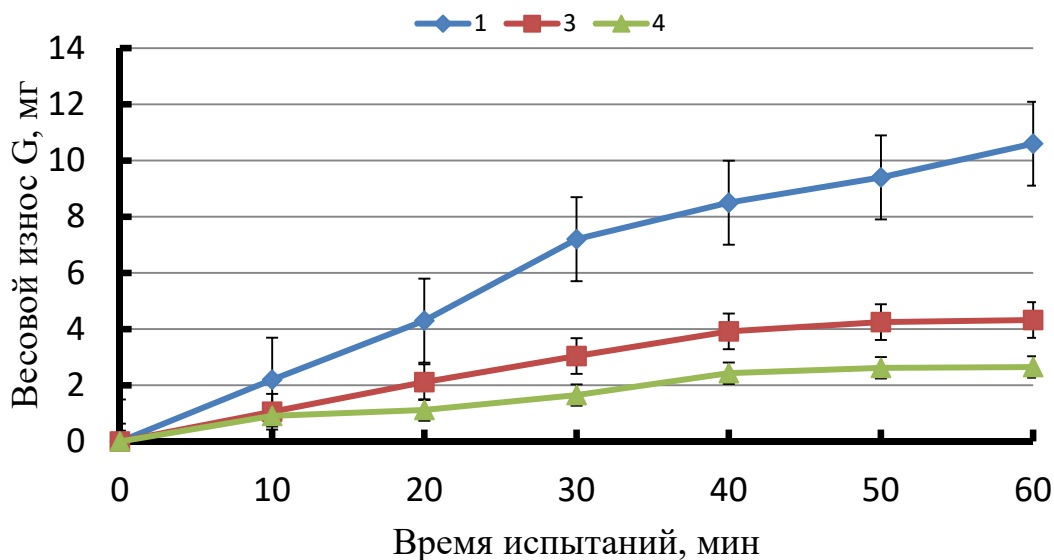
Рисунок 6. Прямое разрешение решетки (масштабная линейка = 5 нм)

Испытания на износостойкость ионно-модифицированной поверхности образцов из стали 45 проводились на универсальной машине трения УМТ2168 при усилии прижатия образцов к контртелу 200 Н и частоте вращения 250 мин^{-1} . Образцы для испытаний были изготовлены Т-образной формы (диаметр рабочей поверхности 12 мм), радиус окружности контакта образца с контртелом – 90 мм.

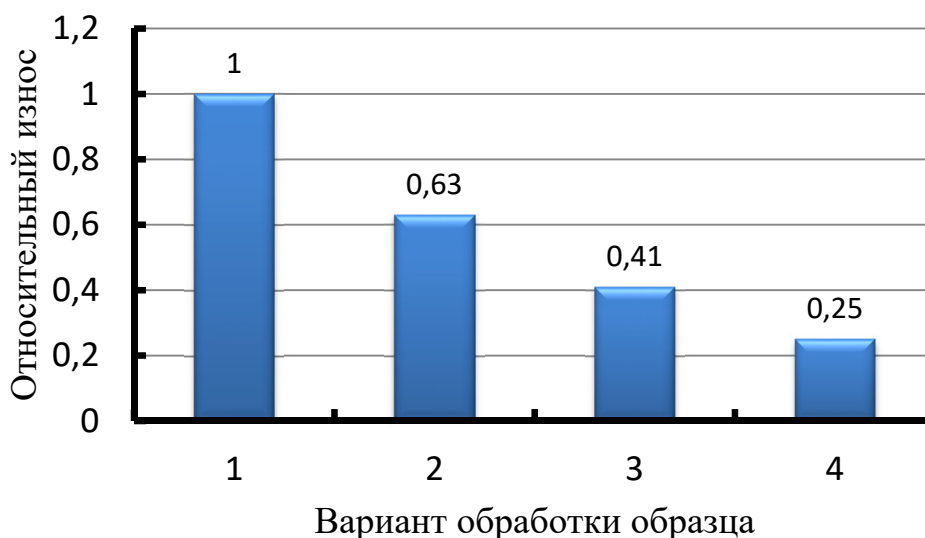
Эксперименты показали, что ионная имплантация повышает износостойкость как самой стали 45, так и газотермического покрытия на

основе стали 50ХФА. В зависимости от сорта имплантируемых ионов повышение износостойкости происходит в разной степени.

Имплантация стали 45 и напыленного покрытия титаном (Рисунок 7) дает наибольший эффект по повышению износостойкости, чем имплантация других элементов.



а



б

Рисунок 7. Весовой износ стали 45 (а) и ее относительный весовой износ (б) после облучения ионами титана (испытания в течение 60 минут):

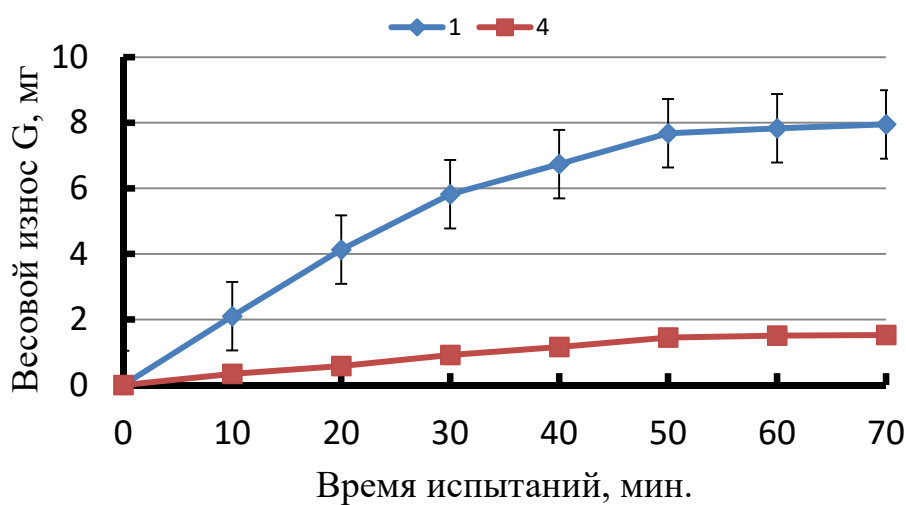
1 – необлученный образец; 2 – флюенс имплантации $5 \cdot 10^{16}$ ион/см²; 3 – флюенс имплантации 10^{17} ион/см²; 4 – флюенс имплантации $5 \cdot 10^{17}$ ион/см²

Повышение износостойкости стали 45 и напыленного слоя газотермического покрытия на основе стали 50ХФА при имплантации титана помимо отмеченных структурных и фазовых изменений, дополнительно связан с образованием в ионно-легированном слое интерметаллидных

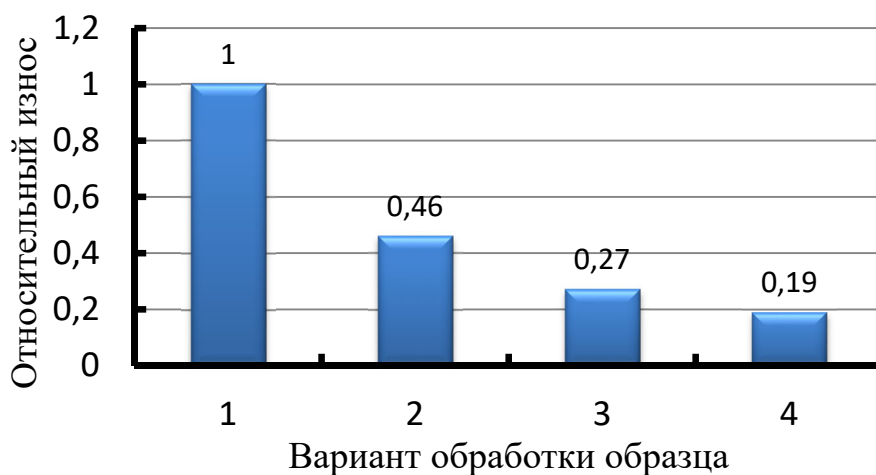
соединений TiFe и TiFe₂. Отмеченные интерметаллидные соединения отличаются повышенной твердостью, что благоприятно сказывается на износостойкости облученных мишеней.

Для повышения износостойкости деталей из стали 45, в частности шатунных шеек коленчатых валов, как до ремонта электродуговой металлизацией, так и после напыления слоя покрытия на основе электродной проволоки 50ХФА целесообразно выполнять имплантацию их поверхностного слоя ионами сплава Cu–Pb при флюенсе $(1-5) \cdot 10^{17}$ см⁻².

При имплантации ионами монотектического сплава 64%Cu–36%Pb наблюдается снижение износа образца, но несколько меньшее, чем в случае имплантации ионов титана (Рисунок 8).



а



б

Рисунок 8. Весовой покрытия на основе стали 50ХФА (а) и ее относительный весовой износ (б) после облучения ионами монотектического сплава 64%Cu–36%Pb (испытания в течение 70 минут): 1 – необлученный образец; 2 – флюенс имплантации $5 \cdot 10^{16}$ ион/см²; 3 – флюенс имплантации 10^{17} ион/см²; 4 – флюенс имплантации $5 \cdot 10^{17}$ ион/см²

В главе 5 представлены результаты промышленного опробования разработанной технологии при восстановлении опытной партии коленчатых валов системы кондиционирования воздуха в пассажирском вагоне. Внешний вид вала после восстановления приведен на Рисунке 9.

Полученные результаты показали, износ стали 45 при трении по валу из стали 45 при нагрузках 25–40 МПа примерно в 8–9 раз выше, чем при трении образцов стали 45 с покрытием из стали 50ХФА с пористостью 6,9%. При нагрузках 80–100 МПа средний приведенный износ в 2–3 раза меньше. Проведенные стендовые испытания восстановленных коленчатых валов компрессора фреона показали, что использование ионной имплантации покрытия, полученного электродуговой металлизацией, позволяет продлить срок гарантированной эксплуатации указанных валов до 8 лет.

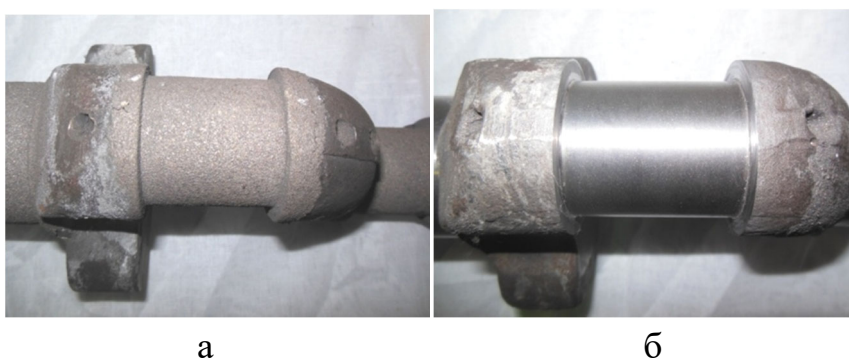


Рисунок 9. Внешний вид шеек вала привода компрессора климатической установки пассажирского вагона непосредственно после электродуговой металлизации (а) и механической обработки (б)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Металлографическим анализом показано, что покрытие при электродуговой металлизации представляет собой слоистый материал, сформированный деформированными частицами, соединенными по контактными поверхностям между собой и с подложкой. Покрытие полученное при электродуговой металлизации имеет высокую пористость (5,56–19,71%) и низкую адгезию; наблюдается местное отслоение покрытия от подложки, а также образование трещин в слое покрытия.

2. Установлено, что прочность сцепления напыленного покрытия с подложкой зависит от метода подготовки поверхности подложки к металлизации и химического состава электродной проволоки, применяемой для формирования напыленного слоя. Наиболее высокие значения твердости

напыленного слоя достигаются при использовании электродных проволок марок 40X13 и 50XФА на уровне 20,4–22,8 МПа.

3. Прочность сцепления покрытия с подложкой в большой степени зависит от технологии подготовки поверхности подложки к металлизации. Из исследованных способов подготовки поверхности подложки наиболее эффективным является зачистка абразивными кругами и ультразвуковая обработка.

4. Прочность сцепления напыленного слоя с подложкой снижается при окислении подложки и поверхности напыляемых частиц. Для устранения влияния окисления предложено аэрозольное флюсование с введением в транспортирующий газовый поток и дуговой промежуток флюса в виде водного раствора Na_2CO_3 с концентрацией 30–60 г/л и расходом 5–10 мл/мин. Применение аэрозольного флюсования водным раствором Na_2CO_3 позволяет увеличить прочность сцепления покрытия с подложкой на 25–52% при снижении уровня открытой пористости до 3,9–5,8%.

5. Увеличение скорости транспортирующего газового потока со 155 до 355–520 м/с способствует уменьшению размера напыляемых частиц до 30–60 мкм и повышению прочности сцепления покрытия с подложкой до 50,5–53,1 МПа при открытой пористости 2,5–3,7%.

6. С помощью пакета программ для классической молекулярной динамики LAMMPS выполнено моделирование процесса проникания ионов меди в мишень из железа и рассчитано распределение внедренной примеси по мере удаления от поверхности мишени. Моделирование показало, что на расстоянии от поверхности мишени порядка 130–150 нм наблюдается пик концентрации внедренных ионов меди, после чего концентрация ионов меди постепенно снижается практически до нуля. Расчетная толщина ионно-легированного слоя для флюенса облучения 10^{18} см^{-2} составляет 450–520 нм.

7. Экспериментально установлено, что наибольшее снижение износа образцов стали 45 с напыленным покрытием и без него при трении в 5,5–6 раз наблюдается при имплантации ионами титана и сплава Cu–Pb с флюенсом в диапазоне $5 \cdot 10^{16}$ – $3,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Увеличение флюенса свыше $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ сопровождается снижением износостойкости имплантированного покрытия.

8. Обнаружено, что в результате полиионной имплантации поверхности напыленного покрытия на основе стали 50XФА в тонком поверхностном слое протекают существенные концентрационные изменения,

с образованием кластеров из внедряемых элементов, а также наблюдается фрагментация структуры на наноуровне.

9. В результате стендовых испытаний установлено, что в условиях, имитирующих цикл работы климатической установки в эксплуатации в железнодорожном составе, срок эксплуатации коленчатых валов без покрытия ограничен 2,5–2,8 года. В тоже время срок эксплуатации коленчатых валов из стали 45 с напыленным слоем составляет 5,3–5,8 года.

10. Разработаны технологические рекомендации на восстановление и упрочнение поверхности коленчатых валов климатической установки железнодорожного пассажирского вагона, которые используются в настоящее время в серийном производстве на ремонтных предприятиях. Снижение стоимости восстановления коленчатых валов по сравнению со стоимостью новых деталей, увеличение сроков их гарантированной эксплуатации в сочетании с решением локальной задачи импортозамещения в комплексе позволит получить весомый экономический эффект.

Разработанная технология по восстановлению и упрочнению коленчатых валов климатической установки железнодорожного пассажирского вагона удостоена золотой медали выставки технического творчества молодежи «НТТМ-2014».

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Олефиренко Н.А., Овчинников В.В. Совершенствование технологии реновации коленчатых валов компрессоров вагонных кондиционеров. Справочник. Инженерный журнал с приложением. Издательство: Издательский дом Спектр (Москва) 2014. №3(204). С.17-22. 80 с. (ВАК)

2. Олефиренко Н.А., Овчинников В.В. Технология восстановления коленчатых валов компрессоров фреона. Заготовительные производства в машиностроении. 2014. №8. С.10-14. 48 с. (ВАК)

3. Олефиренко Н.А., Овчинников В.В. Повышение износостойкости коленчатых валов компрессоров фреона, восстановленных электродуговой металлизацией. Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. №1. С.21-25. 48 с. (ВАК)

4. Износостойкость деталей из стали 45, имплантированной ионами металлов. Н.А. Олефиренко [и др.]. Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. №4. С.33-37. 45 с. (ВАК)

5. Патент РФ №139509 на полезную модель. Коленчатый вал. Олефиренко Н.А., Рожков А.Ю., Олефиренко А.В., Овчинников В.В. Приоритет 08.10.2012; Зарегистрировано 19.03.2014 № 2012142977; Патентообладатель – авторы.

6. Олефиренко Н.А., Овчинников В.В. Восстановление деталей систем кондиционирования подвижного состава железнодорожного транспорта электродуговой металлизацией. Научная перспектива. 2011. №12 С.71-73.78 с.

7. Олефиренко Н.А., Овчинников В.В. Восстановление методом сверхзвуковой электродуговой металлизации коленчатых валов компрессоров системы кондиционирования воздуха пассажирского вагона. Инновационные технологии в машиностроении: проблемы, задачи, решения : сборник научных трудов, гл. ред. А.Н. Емелюшин; отв. Ред. А.А. Веселовский. Орск, Издательство Орского гуманитарно-технологического института (филиала) ОГУ, 2012.С.42–46. 210 с.

8. Олефиренко Н.А., Овчинников В.В. Технология восстановления коленчатых валов компрессора электродуговой металлизацией. «Инновационные материалы и технологии в машиностроительном производстве: материалы II Международной заочной конференции». Орск: Издательство ОГУ, 2013. С.160-164. 187 с.

9. Олефиренко Н.А., Овчинников В.В. Совершенствование технологии восстановления коленчатых валов компрессоров вагонных кондиционеров. Материалы 15-й Международной научно-практической конференции «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика». Часть 1 Санкт-Петербург, 16–19 апреля 2013 г. С. 155–161. 390 с.

10. Олефиренко Н.А., Овчинников В.В. Технологические особенности восстановления коленчатых валов компрессоров фреона электродуговой металлизацией. Электронный Журнал «Известия МГИУ», 2012. № 1(24). С. 27-31. 62 с.

11. Олефиренко Н. А., Овчинников В. В. — Комплексная технология повышения износостойкости рабочих поверхностей коленчатых валов компрессоров фреона. Журнал «Сварочное производство», 2021. № 06 2021. (ВАК)

12. Олефиренко Н.А. - Влияние ионной имплантации на износостойкость покрытия на стали 45, полученного электродуговой металлизацией. 2-я Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов, посвященная памяти академика А.А. Байкова (SPM-2021). Курск, 16 сентября 2021 г.