МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ

ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ

УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

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)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

Овчинников Виктор Васильевич

Москва 2021

2

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Введение……………………………………………………………… 5

Глава 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

ИССЛЕДОВАНИЯ………………………………………… 11

1.1. Анализ характера износа коленчатых валов компрессора установки кондиционирования типа МАБ2……………………… 11

1.2. Наплавка как метод восстановления деталей………………… 16

1.3. Газотермическое напыление при ремонте деталей…………… 24

1.4. Электродуговая металлизация 32

1.5. Влияние ионной имплантации на износостойкость деталей

машин 39

1.6. Цели и задачи исследования 48

Глава 2. МЕТОДИКИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ

ИССЛЕДОВАНИЙ 53

2.1. Оборудование для электродуговой металлизации 53

2.2. Определение прочности сцепления покрытия по штифтовому

методу 55

2.3. Испытания покрытия на твердость 58

2.4. Износостойкость 59

2.5. Исследование структуры напыленного слоя 61

2.6. Оборудование для ионной имплантации 62

2.7. Исследование структуры имплантированного слоя на сканирующем электронном микроскопе 67

2.8. Исследование поверхностных слоев методом вторично-ионной масс-спектроскопии 68

2.9. Измерение микро и нанотвердости поверхностных слоев 69

2.10. Просвечивающая электронная микроскопия 71

3

Стр.

2.11. Рентгеноструктурный анализ 73

2.12. Испытания на износ имплантированных образцов 75

Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ

ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА

НАПЫЛЕННОГО СЛОЯ И ПОДЛОЖКИ 77

3.1. Металлографические исследования структуры слоя покрытия после электродуговой металлизации 77

3.2. Влияние теплового воздействия струи распыляемого материала на структуру и свойства подложки стали 45 82

3.3. Влияние химического состава электродной проволоки на структуру и свойства напыленного покрытия 85

3.4. Исследование содержания кислорода на участках отслоения покрытия... 93

3.5. Воздействие на подложку для повышения прочности сцепления на границе подложка–напыленный слой 95

3.6. Аэрозольное флюсование при электродуговой металлизации

стали 45 106

3.7. Воздействие на распыляемый материал при электродуговой металлизации 114

3.8. Влияние марки электродной проволоки на износостойкость

напыленного покрытия 124

Выводы к главе 3…………………………………………………… 127

Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ НА

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ 129

4.1. Моделирование процесса ионной имплантации с помощью пакета программ для классической молекулярной динамики 129

4.2. Результаты экспериментального исследования глубины проникания

ионов при имплантации стали 45 и напыленного покрытия 141

4

Стр.

4.3. Микроструктура ионно-легированного слоя покрытия, напыленного на сталь 45 после ионной имплантации титаном 148

4.4. Влияние ионной имплантации на трибологические характеристики

стали 45 и газотермического покрытия 154

Выводы к главе 4…………………………………………………… 163

Глава 5. ПРОМЫШЛЕННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

ИССЛЕДОВАНИЙ………………………………………………… 164

5.1. Восстановление вала привода компрессора климатической установки пассажирского вагона………………………………… 164

5.2. Износостойкость коленчатых валов после восстановления электродуговой металлизацией…………………………………… 169

5.3. Результаты испытаний коленчатых валов компрессора фреона 174

5.4. Повышение ремонтопригодности коленчатого вала компрессора фреона……………………………………………… 177

5.5. Технологические мероприятия по совершенствованию процесса электродуговой металлизации коленчатых валов компрессора фреона при 179

восстановлении………………………………………………………

Выводы к главе 5………………………………………………………… 188

ЗАКЛЮЧЕНИЕ………………………………… 190

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ………………………………………………………... 193

ПРОЛОЖЕНИЯ 210

5

ВВЕДЕНИЕ

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.

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

6

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 поверхностного 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.B., 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.

7

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 Na2CO3 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•1016– 3,2•1017 см–2. Увеличение флюенса свыше 5•1017 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:

8

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 эксплуатировавшихся, 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. Влияние предварительной имплантации ионами сплава Cu–Pb–Sn на

повышение прочности сцепления покрытия с подложкой.

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

4. 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.

9

5. 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 трех научно-практических конференциях, в том числе: 14-я Международная научно-практическая

10

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 и 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

 Металлографическиманализомпоказаночтопокрытие при

электродуговойметаллизациипредставляетсобойслоистыйматериал

сформированныйдеформированнымичастицамисоединенными по

контактнымповерхностяммеждусобойисподложкойПокрытиеполученное

приэлектродуговойметаллизацииимеетвысокуюпористость–и

низкуюадгезиюнаблюдаетсяместноеотслоениепокрытияотподложкиатакже

образованиетрещинвслоепокрытия

 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ХиХФАна

уровне–МПа

 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

 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сконцентрацией–глирасходом–млминПрименение

аэрозольногофлюсованияводнымрастворомпозволяетувеличить

прочностьсцепленияпокрытиясподложкойна–присниженииуровня

открытойпористостидо–

 Увеличениескороститранспортирующегогазовогопотокасодо–

мсспособствуетуменьшениюразмеранапыляемыхчастицдо–мкми





повышениюпрочностисцепленияпокрытиясподложкойдо–МПаприоткрытойпористости–

 Спомощьюпакетапрограммдляклассическоймолекулярнойдинамики

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–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см–составляет–нм

 Экспериментальноустановленочтонаибольшееснижениеизноса

образцовсталиснапыленнымпокрытиемибезнегопритрениив–раз

наблюдаетсяприимплантацииионамититанаисплава–сфлюенсомв

диапазоне•–•см–Увеличениефлюенсасвыше•см–

сопровождаетсяснижениемизносостойкостиимплантированногопокрытия

 Обнаруженочтоврезультатеполиионнойимплантацииповерхности

напыленногопокрытиянаосновесталиХФАвтонкомповерхностномслое

протекаютсущественныеконцентрационныеизменениясобразованием

кластеровизвнедряемыхэлементоватакженаблюдаетсяфрагментация

структурынананоуровне

 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–годаВтожевремясрокэксплуатацииколенчатыхваловиз

сталиснапыленнымслоемсоставляет–года

 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