На правах рукописи

ЕНов

Новиков Евгений Петрович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГОЛОВОК БЛОКОВ ЦИЛИНДРОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫХМАТЕРИАЛОВ

Специальность 05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел –2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Юго-Западный государственный университет» на кафедре автомобилей и автомобильного хозяйства

Научный руководитель:	**Агеева Екатерина Владимировна** кандидат технических наук, доцент.
Официальные оппоненты:	**Горленко Александр Олегович** доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», профессор кафедры автомобильного транспорта, г. Брянск; **Карпенко Вадим Юрьевич** кандидат технических наук, ООО «КВАЛИМЕТ», генеральный директор, г. Курск.
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», г. Воронеж.

Защита диссертации состоится **«09» июля 2019 г. в 13-30 часов** на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.111.03 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук при ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: **302030, г. Орел, ул. Московская, д.77.**

С диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте (www.oreluniver.ru) Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» и в Фундаментальной библиотеке университета.

Автореферат разослан **« » мая 2019 г.** Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации размещены в сети Интернет на официальном сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» (www.oreluniver.ru) и на официальном сайте Минобрнауки РФ (https://minobrnauki.gov.ru/).

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации направлять в диссертационный совет по адресу: 302026, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95.

Телефон для справок +7(920)801-97-18. E-mail: bar20062@yandex.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 999.111.03 Баранов Юрий Николаевич

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В настоящее время технологии реновации дефектных деталей относятся к разряду наиболее ресурсосберегающих, так как по сравнению с изготовлением новых деталей сокращаются затраты на 70 %. Одним из основных источником экономии ресурсов при этом являются затраты на материалы. В среднем затраты на материалы при изготовлении деталей составляют 38%, а при восстановлении – 6,6% от общей себестоимости автомобильной детали. Это касается и двигателей внутреннего сгорания (ДВС), в том числе и головок блоков цилиндров (ГБЦ).

На данный момент одним из перспективных способов восстановления дефектных деталей автомобилей является газодинамическое нанесение покрытий (ГДН). Одной из проблем использования технологии ГДН является качество применяемых порошковых материалов (ПМ). Анализ современной научно-технической литературы показал, что перспективными и промышленно не применяемыми являются порошковые материалы, получаемые из токопроводящих отходов электроэрозионным диспергированием. Однако, эти материалы не применялись до настоящего времени в технологиях восстановления дефектных деталей автомобилей ГДН, в том числе и ГБЦ.

Целесообразность решения этих вопросов определила выбор темы, формулировкой цели, постановкой задач и основными направлениями исследования.

Описанное выше удостоверяет, что тематика проводимых исследований представляется актуальной и ориентирована для разрешения научно-практической проблемы, обладающей существенной народно-хозяйственной ценностью.

Степень ее разработанности.

Значительные достижения в области совершенствования способов восстановления автомобильных деталей внесли следующие ученые: Л.В. Дехтеринский; И.Е. Дюмин; В.А. Шадричев; В.И. Червоиванов; И.Е. Ульман; А.Н. Батищев; И.Г. Голубев; А.Н. Новиков; А.В. Коломейченко, Р.И. Ли; В.П. Лялякин; Р.А. Латыпов; В.А. Денисов; В.И. Иванов; В.И. Казарцев; В.И. Карагодин; Н.В. Молодык; П.В. Сенин; В.И. Серебровский; Д.Б. Слинко; С.А. Соловьев; Ф.Х. Бурумкулов; и другие.

На основании выполненных работ предложен ряд способов и средств, позволяющих восстанавливать дефектные автомобильные детали различными способами. Однако, в трудах этих ученых недостаточно рассматриваются вопросы восстановления ГБЦ способом газодинамического напыления, в частности с применением электроэрозионных материалов.

Цель работы. Совершенствование процесса газодинамического напыления дефектных головок блоков цилиндров путем применения электроэрозионных алюмосодержащих материалов, полученных электроэрозионным диспергированием алюминиевых металлоотходов.

В соответствии с поставленной целью необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ дефектов ГБЦ, а кроме того обзор способов их устранения.

2. Осуществить обзор порошковых материалов, которые используются для газодинамического напыления автомобильных деталей, а также изучить технические особенности переработки алюминиевых отходов в порошковые материалы способом электроэрозионного диспергирования.

3. Теоретически аргументировать вероятность обеспечения эксплуатационных параметров восстановленных ГБЦ, автомобильных двигателей.

4. Провести экспериментальные исследования микроструктуры, элементного, фазового состава, микротвердости, устойчивости к воздействию температуры, адгезионной и коррозионной стойкости покрытий восстановленных ГБЦ, влияющих на их ресурс.

5. Усовершенствовать процесс восстановления ГБЦ, автомобильных двигателей электроэрозионными материалами.

6. Провести эксплуатационные испытания ГБЦ, восстановленной согласно разработанной маршрутно-операционной технологии.

7. Осуществить технико-экономическое подтверждение внедрения разработанной маршрутно-операционной технологии.

Объект исследования – ГБЦ из алюминиевых сплавов двигателей автомобилей.

Предмет исследования – технология восстановления дефектных ГБЦ автомобильных двигателей газодинамическим напылением с применением алюмосодержащих электроэрозионных материалов.

Научная новизна работы состоит:

– в установлении взаимосвязей между рабочими характеристиками газодинамических покрытий восстановленных головок блоков цилиндров из алюминиевых сплавов и свойствами разработанного алюмосодержащего материала; позволяющими отказаться от рекомендуемого для газодинамического напыления головок блоков цилиндров из алюминиевых сплавов порошкового материала марки А-20-11 без ущерба качеству покрытия;

– в установлении взаимосвязей между параметрами процесса получения нового напыляемого алюмосодержащего материала для газодинамических покрытий и его свойствами, позволяющими повышать качество покрытий, восстановленных головок блоков цилиндров автомобилей.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит:

а) в обосновании оптимальных параметров процесса газодинамического напыления и размера частиц напыляемого алюмосодержащего материала;

б) в обосновании использования перспективного технологического процесса восстановления дефектных головок блоков цилиндров автомобилей, посредством использования разработанных газодинамических покрытий,

полученных с использованием алюмосодержащих электроэрозионных материалов;

в) в исследовании и разработке технологии получения металлического алюмосодержащего порошкового материала электроэрозионным диспергированием в дистиллированной воде (патент РФ № 2664149), пригодного для абразивной очистки дефектных деталей автомобилей;

г) в исследовании и разработке технологии получения металлического алюмосодержащего порошкового материала электроэрозионным диспергированием в дистиллированной воде (патент РФ № 2612117), пригодного для газодинамического напыления дефектных ГБЦ двигателей автомобилей;

д) в исследовании и разработке технологии восстановления дефектных ГБЦ двигателей автомобилей газодинамическим напылением с применением электроэрозионных алюмосодержащих материалов, которые способствуют обеспечению восстановленным автомобильным деталям высоких эксплуатационных показателей, таких как коррозионная и адгезионная стойкость, а также способность работать в условиях значительного перепада температур. Усовершенствованная маршрутно-операционная технология отличается научно-технической гибкостью, малой трудоемкостью, низкой себестоимостью, а также удовлетворяет современным нормативным показателям экологической безопасности. Усовершенствованные технологические решения можно использовать при восстановлении обширной номенклатуры автомобильных деталей.

Итоги исследований проведенных в диссертационной работе используются в учебном процессе при подготовке аспирантов и студентов в ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» г. Курск.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач в процессе теоретических исследований использовались механика контактных взаимодействий, а также полный факторный эксперимент. Экспериментальные исследования осуществлены посредством организации перспективных подходов и научных доказательств суждений на базе работ российских и иностранных научных работников в сфере восстановления дефектных автомобильных двигателей. Выполнение установленных задач велось с применением прогрессивного оснащения с применением современных методик экспериментальных исследований и эксплуатационных испытаний.

Положения, выносимые на защиту

1. Технология восстановления ГБЦ из алюминиевых сплавов двигателей автомобилей газодинамическим напылением с применением электроэрозионных алюмосодержащих материалов.

2. Комплекс результатов экспериментальных исследований влияния качества новых алюмосодержащих материалов, полученных электроэрозионным диспергированием алюминиевых металлоотходов, на качество восстановленных ГБЦ и свойства газодинамических покрытий.

3. Технологические решения, позволяющие получать термостойкие и коррозионностойкие покрытия на ГБЦ двигателей автомобилей, требующих ремонта.

Степень достоверности полученных результатов. Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, выносимых на защиту, обеспечиваются принятой методологией исследования, включающей в себя современные научные методы, апробацией при обсуждении результатов диссертации на международных научно-технических конференциях, а также оценкой погрешности эксперимента статистическими методами и успешной реализации разработанной технологии в производстве.

Это позволило обеспечить репрезентативность, доказательность и обоснованность разработанных положений и полученных результатов. Достоверность теоретических положений и выводов диссертации подтверждена положительными результатами при внедрении в практическую деятельность, отмеченных в подразделе «Реализация результатов работы».

Реализация результатов работы. Разработанная на основе совершенствования метода газодинамического напыления технология апробирована и внедрена в ООО «КСТ» г. Курск.

Материалы исследований внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет».

Апробация и реализация результатов работы. Основные теоретические положения и научные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на Международных, Всероссийских конференциях и семинарах: «Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования» (Воронеж, 2015); «Будущее науки – 2015» (Курск, 2015 г.); «Современные автомобильные материалы, техника и технология» (Курск, 2015 г.); «Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса» (Орел, 2016 г.); «Прогрессивные технологии ремонта и технического обслуживания машин» (Москва, 2016 г.); «Молодежь и системная модернизация страны» (Курск, 2016 г.); «Применение нанотехнологий в транспортно-технологическом комплексе» (Воронеж, 2016. г.); «САМИТ-2016» (Курск, 2016 г.); «Перспективное развитие науки, техники и технологий» (Курск, 2017 г.); «Интеллектуальные машинные технологии и техника в сельском хозяйстве» (Москва, 2017 г.); «Автомобили, транспортные системы и процессы: настоящее, прошлое и будущее» (Курск, 2018 г.); «Инновационные технологии и инновации на транспорте» (Орел, 2018 г.); «Молодежь и наука: шаг к успеху» (Курск, 2018 г.) и др.

Соответствие диссертационной работы паспорту специальности. Выполненные исследования отвечают пункту 16 «Совершенствование методов восстановления деталей, агрегатов и управление авторемонтным производством» паспорта научной специальности 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта».

Личный вклад автора заключается в постановке и решении актуальной

и важной научно-производственной задачи, на основе разработанных: концепции исследования, идей и целей диссертационной работы; теоретико-методологических и научно-методических положений для решения всех элементов научной новизны; совершенствовании методов восстановления дефектных деталей, применении новых газодинамических покрытий на основе электроэрозионных материалов. Автором лично выполнен весь объем экспериментальных исследований, проведены необходимые расчеты, обработка результатов и их анализ, выбран комплекс методик для аттестации порошков и изделий из алюмосодержащих порошковых материалов и газодинамических покрытий. Автор принимал непосредственное участие в разработке методики проведения эксперимента.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в полном объеме отражены в 26 научных работах, в том числе 3 статьи в ведущих изданиях из перечня рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертаций, 1 статья в журнале, индексируемом международной системой цитирования Scopus, 1 монография, получено 2 патента на изобретение РФ № 2612117 и № 2664149.

Структура и объем работы. Диссертационная работа включает в себя введение, четыре главы, заключение, общие выводы, список использованных источников, а также приложения. Полный объем диссертации включает в себя 168 страниц, в том числе 35 таблиц, 73 рисунка, 36 формул, 8 страниц приложений. Список использованных источников состоит из 118 наименований.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решаемой задачи, сформулированы цель и задачи исследования, изложена научная новизна и практическая значимость работы, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Анализ состояния вопроса, цель и задачи исследований» выполнен анализ основных дефектов ГБЦ автомобильных двигателей и методы их устранения.

Головки блоков цилиндров относятся к базовым автомобильных деталям, которые обеспечивают определенное расположение деталей и механизмов автомобильных двигателей. ГБЦ с деталями клапанного механизма работает в очень тяжелых условиях – при высоких температурах и под воздействием механических и тепловых нагрузок. Все это приводит к образованию дефектов, таких как нагар, трещины и коробление плоскости прилегания к блоку и т.д. Появление данных видов дефектов приводит к выходу из строя двигателя внутреннего сгорания, простою техники, а также уменьшения уровня технической готовности автомобильного парка.

Технологические операции по восстановлению дефектных автомобильных деталей позволяют сокращать экономические и трудовые затраты более чем на 70 % в сравнении и изготовлением новых автомобильных деталей, в том числе и ГБЦ.

Установлено, что наиболее перспективным способом восстановления дефектных головок блоков цилиндров является газодинамическое напыление. Высокоскоростное газодинамическое напыление является конкурентом и наиболее близким аналогом детонационного напыления. В условиях высокоскоростного напыления материал сосредоточивается вблизи оси струи. Угол расхождения сверхзвуковых потоков состоящих из двух фаз меньше, чем у дозвуковых потоков, и имеет значение равное от 5 до 7°. Данный факт способствует уменьшению размера диаметра поверхности напыления, а также значительно экономному применению порошковых частиц. Коэффициент применения порошковых частиц составляет 0,85 хотя у классического электродугового напыления он имеет значение 0,75.

Во второй главе «Теоретические предпосылки повышения эффективности восстановления дефектных головок блоков цилиндров автомобильных двигателей» рассмотрены факторы, влияющие на образование дефектов и повышения ресурса восстановленных ГБЦ ДВС автомобилей.

Момент взаимосвязи алюмосодержащих частиц с плоскостью состоит из трех этапов.

На первом этапе происходит очищение плоскости дефектной ГБЦ от масла, окислов, коррозии и других загрязнений за счет потока частиц вылетающих с большой скоростью. При этом происходит активация плоскости за счет оголения ювенильных участков.

На втором этапе формируется участок контакта плоскости с покрытием. Некоторое количество алюмосодержащих частиц в момент соударения врезается в плоскость, а следовательно образуется надежное сцепление с плоскостью. В момент контакта алюмосодержащих частиц с плоскостью ГБЦ частицы подвергаются пластической деформации и создается химическая взаимосвязь в пятне контакта.

На третьем этапе формируются следующие слои газодинамического покрытия. В процессе наращивания газодинамического покрытия алюмосодержащие частицы прикрепляются не к плоскости ГБЦ, а уже к закрепленным ранее частицам.

В момент тесного взаимодействия ювенильных поверхностей материалов с разнородными структурами имеет возможность появление межмолекулярных взаимосвязей этих материалов.

Ключевой момент в этом играет механическое прилипание алюмосодержащих частиц ПМ с поверхностью ГБЦ, в частности, при глубоком проникновении частиц.

Основополагающей теорией при разработке энергоэффективного оборудования, которое обладает высокой надежностью, является механика контактного взаимодействия.

В процессе газодинамического напыления частицы шаровидной формы приобретают большое ускорение, за счет этого происходит вытягивание формы и они становятся эллиптическими. Чтобы вычислить максимальное контактное давление необходимо рассмотреть взаимодействие тел несогласованной формы.

Пусть область контакта имеет форму эллипса, a- большая полуось, b- малая полуось, $R_e=(R'R'')^{1/2}$– эквивалентный радиус кривизны.

Полная нагрузку P определяется по формуле 1:

$$P=2/3p_0\pi ab \quad (1)$$

откуда среднее контактное давление, действующее на каждое тело:

$$p_m=2/3\ p_0 \quad (2)$$

где p_0 – максимальное контактное давление

Распределение давления определяется выражением:

$$p= p_0(1-x^2/a^2- y^2/b^2)^{1/2} \quad (3)$$

Давление, действующее на второе тело, тождественно найденному, вводя в рассмотрение приведенный модуль упругости E^*

$$\frac{1}{E^*}=\frac{1-\mu_1^2}{E_1}+\frac{1-\mu_2^2}{E_2} \quad (4)$$

где E_1 и E_2 – модули упругости, а μ_1 и μ_2 коэффициенты Пуассона обоих тел.

с учетом

$$a/b\approx(R'/R'')^{2/3} \quad (5)$$

Максимальное контактное давление

$$p_0=\frac{3P}{2\pi ab}=\left(\frac{6PE^{*2}}{\pi^3R_e^2}\right)^{1/3}\cdot[F_1(R'/R'')]^{-2/3} \quad (6)$$

Функции $F_1(R'/R'')$ *и* $F_2(R'/R'')$могут рассматриваться как «поправочные коэффициенты», учитывающие эксцентриситет эллипса, и в первом приближении можно принять равными единице.

Введем в (6) коэффициент, учитывающий размер напыляемых частиц – $K= 1/R_e=1/(\sqrt{2}R)$,$(мкм)^{-1}$получим:

$$p_0=\left(\frac{6PE^{*2}K^2}{\pi^3}\right)^{1/3} \quad (7)$$

где P – полная нагрузка (Н), E^*– приведенный модуль упругости (Па).

Пусть P = 0,5 МПа, при напылении алюмосодержащих частиц диаметром d= 20 мкм, R будет иметь значение 10 мкм, E_1 и E_2 будут равны между собой, и иметь значение 65 ГПа, μ = 0,38, получим, что максимальное давление в центре

контактной области P_0=8,7 ГПа. Среднее давление, производимое при столкновении частицы с подложкой, p_m= 5, 8 ГПа.

Как видно из (7) с увеличение размера напыляемых частиц контактное давление уменьшается.

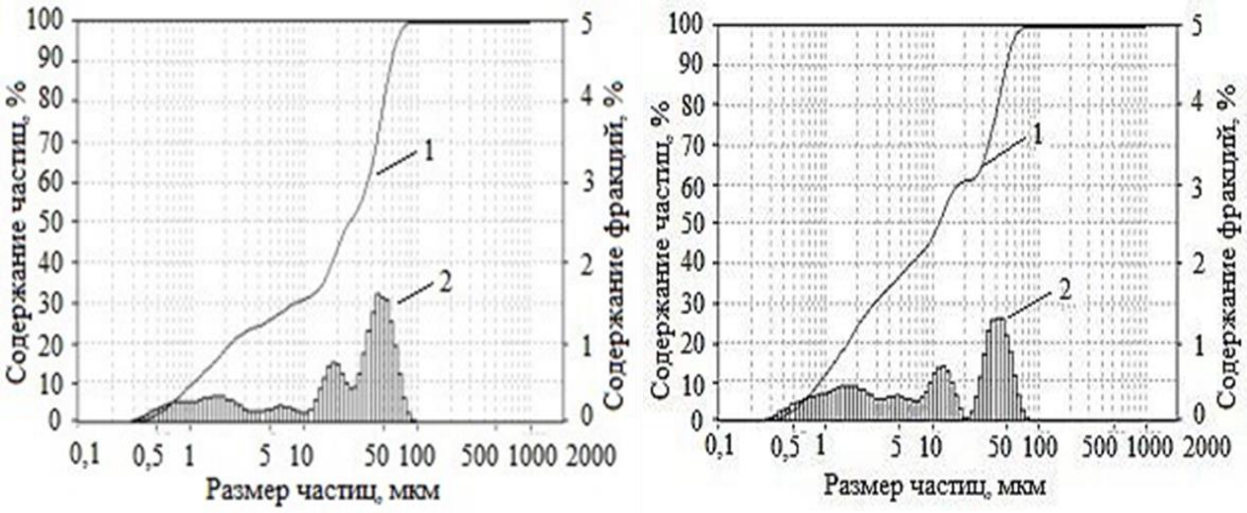
Исходя из выведенной формулы (7), можно сделать предположение, что уменьшение размера напыляемых частиц, будет способствовать увеличению контактного давления, а следовательно способствовать улучшению адгезионной прочности и коррозионной стойкости газодинамических покрытий.

В третьей главе «Материалы и методики исследования» представлены: методы исследования электроэрозионных ПМ, используемых при восстановлении дефектных ГБЦ; объект реновации; методы исследования газодинамических покрытий; методика проведения эксплуатационных испытаний, а также оборудование, используемое при выполнении исследований.

При решении поставленных задач использовались современные методы испытаний и исследований, в том числе: электроэрозионные ПМ получали методом электроэрозионного диспергирования на установке для получения нанодисперсных порошков из токопроводящих материалов (Патент РФ № 2449859); исследования формы и морфологии микрочастиц определяли с помощью растрового электронного микроскопа фирмы «FEI» «Quanta 600 FEG»; рентгеноструктурный анализ электроэрозионных материалов проводили на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV; гранулометрический состав определяли на лазерном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoTec»; рентгеноспектральный микроанализ электроэрозионного материала определяли с помощью энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы «EDAX»; испытания твердости образцов по поверхности проводили с помощью прибора для испытания на твердость по Бринеллю 3000 BLD (Instron) в соответствии с ГОСТом 9012-59 (Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю); для испытания образцов с целью определения адгезионной/когезионной прочности, стойкости к царапанью и определения механизма разрушения использовали скретч-тестер Revetest (CSM Instruments);испытания коррозионной стойкости газодинамических покрытий проводили по методике ускоренных испытаний с помощью многоканального потенциостат-гальваностата «Elins P-20X8; испытания коррозионной стойкости газодинамических покрытий проводили по методике ускоренных испытаний с помощью многоканального потенциостат-гальваностата «Elins P-20X8.

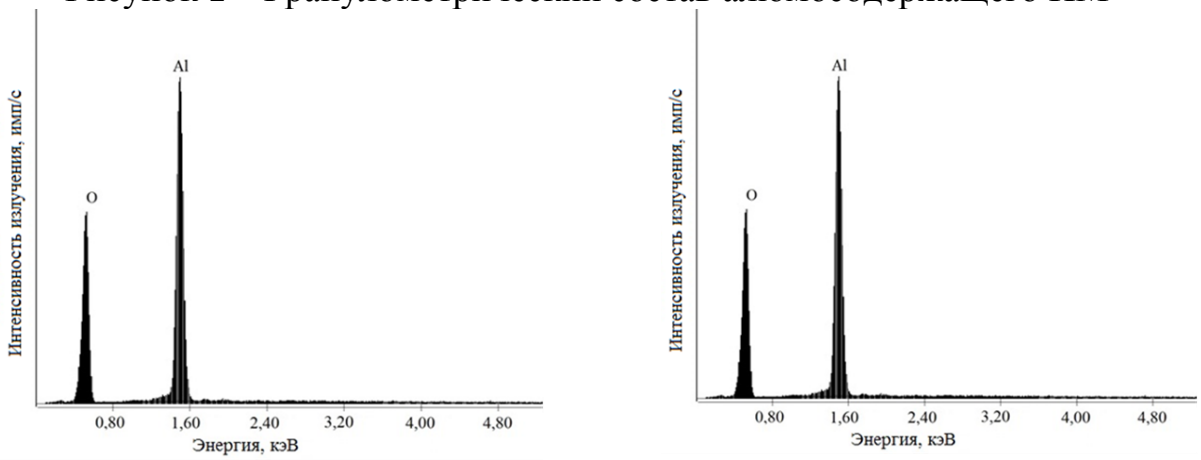
В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований» представлены результаты исследования электроэрозионных ПМ, используемых при восстановлении дефектных ГБЦ двигателей автомобилей и восстановленных деталей.

Результаты экспериментальных исследований новых электроэрозионных ПМ использованных при восстановлении дефектных ГБЦ ДВС автомобилей представлены на рисунках 1-3.



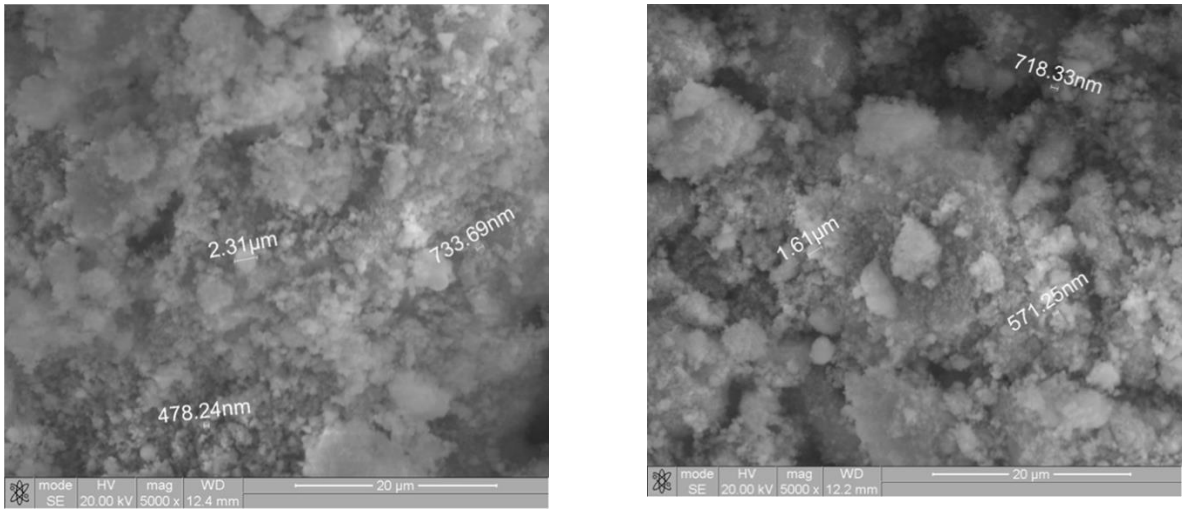
С – 65 мкФ, Ux – 90 В., V – 50 Гц С – 65 мкФ, Ux – 100 В., V – 140 Гц

Рисунок 1 – Гранулометрический состав алюмосодержащего ПМ



С – 65 мкФ, Ux – 90 В., V – 50 Гц С – 65 мкФ, Ux – 100 В., V – 140 Гц

Рисунок 2 – Рентгеноспектральный состав алюмосодержащего ПМ



С – 65 мкФ, Ux – 90 В., V – 50 Гц С – 65 мкФ, Ux – 100 В., V – 140 Гц

Рисунок 3 – Снимки поверхности частиц алюмосодержащего ПМ

Экспериментальные исследования алюмосодержащего ПМ (параметры: С – 65 мкФ; Ux – 90 В; V – 50 Гц.) позволили установить, что о средний размер частиц составляет 28,5 мкм, удельная площадь поверхности – 16266,5 см^2/см^3.

Установлено, что коэффициент элонгации (удлинения) частиц размером 25,489 мкм составляет 1,245, что говорит о сферической форме частиц алюмосодержащего порошкового материала. Основными фазами в алюмосодержащем ПМ являются Al_2O_3, $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ и $Al(OH)_3$.

Экспериментальные исследования алюмосодержащего ПМ (параметры: С – 65 мкФ; Ux – 100 В; V – 140 Гц.) позволили установить, что средний размер частиц составляет 19,96 мкм, удельная площадь поверхности – 21621,56 $см^2/см^3$. Установлено, что коэффициент элонгации (удлинения) частиц размером 11,445 мкм составляет 1,8, что говорит о сферической форме частиц алюмосодержащего ПМ. Основными фазами в алюмосодержащем ПМ являются байерит – $Al(OH)_3$ и гиббсит – $Al(OH)_3$.

Экспериментально установлено, что основными элементами ПМ, полученного методом ЭЭД из алюминиевых отходов, являются алюминий и кислород.

ПМ, полученный методом ЭЭД из алюминиевых отходов, состоит из частиц правильной сферической формы (или эллиптической), неправильной формы (конгломератов) и осколочной формы.

Разработанная маршрутно-операционная карта восстановления дефектных ГБЦ методом газодинамического напыления с использованием электроэрозионных материалов (алюмосодержащий ПМ, полученный из отходов алюминия методом электроэрозионного диспергирования в воде дистиллированной), позволяет восстанавливать дефектные ГБЦ без экологически вредных выбросов в атмосферу.

От режима напыления в наибольшей степени зависит толщина напыляемого слоя и адгезия, т.е. основные показатели, определяющие прочность и термостойкость детали, а также ее долговечность в эксплуатации. Отсюда следует важность соблюдения режимов напыления в процессе восстановления деталей автомобилей.

Определение оптимальных параметров процесса напыления и размера частиц напыляемого материала проводили постановкой полного факторного эксперимента по значению адгезии полученного покрытия.

Уровни и интервалы варьирования факторов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования

Наименование	Факторы		
	X_1 (давление воздуха (P)), МПа	X_2 (расход ПМ (Q)), г/с	X_3 (средний размер частиц (D)), мкм
Основной уровень	0,4	0,3	20
Интервал варьирования	0,1	0,1	10
Верхний уровень (+)	0,5	0,4	30
Нижний уровень (-)	0,3	0,2	10

После перехода к кодированным значениям была построена матрица планирования эксперимента, а также произведены вычисления коэффициентов модели.

Уравнение регрессии в общем виде имеет вид:

$$Y = b_0+b_1X_1+ b_2X_2+ \ldots+b_кX_к + b_{1,2}\cdot X_1 X_2 + b_{1,3}\cdot X_1 X_3+ \ldots+b_{к-1,к}\cdot X_{к-1,к}\cdot X_к \quad (8)$$

где $b_1, b_2, \ldots, b_к$ – линейные эффекты;

$b_{12}, b_{13}, \ldots, b_{к-1,к}$ – эффекты парного взаимодействия.

В результате расчетов, получили следующие значения:

– свободный член – b_0= 75

– коэффициенты регрессии, характеризующие линейные эффекты – b_1 = 8,5; b_2 = 6,3; b_3 = 20,5.

– коэффициенты парного взаимодействия – b_{12} = 0,5; b_{13} = 6,1; b_{23}= 1,3; b_{123} = 0,1.

Значимость коэффициентов в уравнении регрессии проверяли по критерию Стьюдента:

$$t_j = |bj|/Sb_j \quad (9)$$

где b_j – j-й коэффициент уравнения регрессии;

Sb_j – среднее квадратичное отклонение j-го коэффициента.

Получили: t_0 = 379,5; t_1 = 42,5; t_2 = 31,5; t_3 = 102,5;t_{12} = 2,5; t_{13} = 12,2; t_{23} = 6,5; t_{123}= 0,5.

Табличное значение критерия Стьюдента (уровень значимости p=0,05, число степеней свободы f=2): $t_p(f)$ = 4,3, следовательно, коэффициенты b_{12} и b_{123} не значимы.

Тогда уравнение регрессии для ГДН дефектных ГБЦ примет вид:

$$Y = 75,9 +8,5X_1+ 6,3X_2+ 20,5X_3 + 6,1\cdot X_1 X_3+ 1,3\cdot X_2 X_3 \quad (10)$$

Согласно полученной модели параметр оптимизации возрастает с увеличением значений факторов X_1, X_2и X_3. Причем наибольшее влияние оказывает параметр X_3, т.е. средний размер частиц.

Проверку адекватности модели производили по F-критерию Фишера. В результате расчетов получили F_p = 1,9. Табличное значение $F_т$– критерия при 5 % уровне значимости и числах степеней свободы для числителя 4 и для знаменателя 2 равно 19,3. $F_p<F_т$. Следовательно, модель адекватна.

С целью установления взаимосвязей влияния параметров газодинамического напыления, на пористость газодинамических покрытий, были получены девять образцов с покрытиями при различных режимах установки.

Напыление производилось методом газодинамического напыления на установке ДИМЕТ-404. Для напыления использовались порошковые материалы, полученные методом ЭЭД при следующих параметрах установки: ёмкость разрядных конденсаторов 65 мкФ, напряжение 100 В., частота импульсов 140 Гц.

Порошковые материалы напыляли под углом 90°, на расстоянии 10-15 мм, при этом использовали температурный режим № 3. В процессе напыления меняли следующие параметры:

– давление воздух, от 0,4 до 0,6 МПа;

– расход порошкового материала, от 0,2 до 0,4 г/с;

– средний размер напыляемых частиц, от 20 до 40 мкм.

После чего исследовали пористость, полученных газодинамических покрытий.

По экспериментальным данным построили графики зависимости пористости газодинамических покрытий от давления воздуха, расхода порошкового материала и среднего размера напыляемых частиц, представленные на рисунках 4-6.

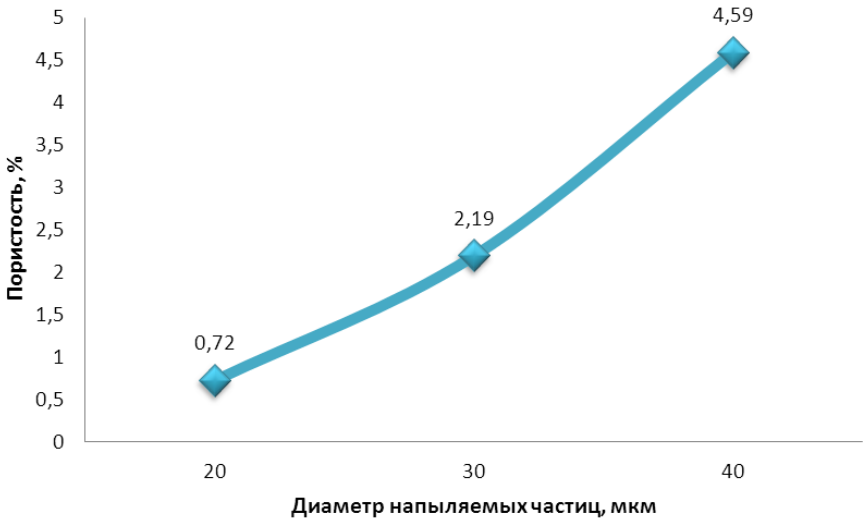


Рисунок 4 – Влияние среднего диаметра напыляемых частиц на пористость газодинамических покрытий

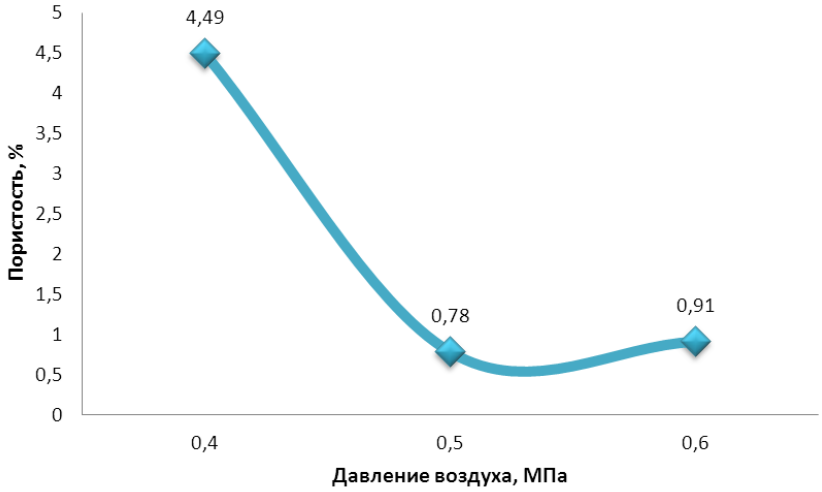


Рисунок 5 – Влияние давления воздуха установки ДИМЕТ на пористость газодинамических покрытий

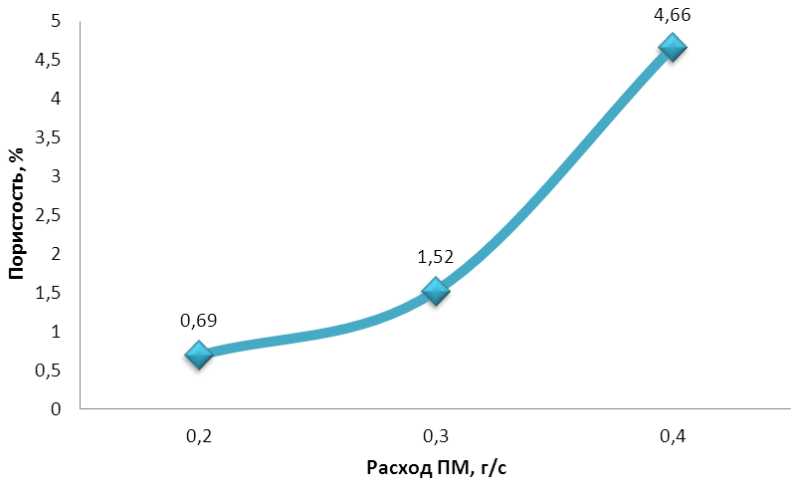


Рисунок 6– Влияние расхода ПМ на пористость газодинамических покрытий

Из представленных графиков видно, что при увеличении среднего диаметра напыляемых частиц с 20 мкм до 40 мкм, пористость покрытий увеличивается на 3,97 %. При увеличении давления воздуха с 0,4 МПа до 0,5 МПа значение пористости покрытий уменьшается на 3,71 %, причем при дальнейшем увеличении значения давления воздуха, пористость покрытий начинает снова увеличиваться. При увеличении расхода порошкового материала с 0,2 г/с до 0,4 г/с, значение пористости газодинамический покрытий увеличивается на 3,97 %.

Таким образом, учитывая данные полного факторного эксперимента и значения исследований пористости газодинамических покрытий, можно сделать вывод, что оптимальными параметрами для процесса восстановления дефектной ГБЦ способом газодинамического напыления являются: средний размер напыляемых металлических частиц 20 мкм, давление воздуха 0,5 МПа, температурный режим №3, расход порошкового материала 0,2 г/с.

Для исследования металлографических и триботехнических свойств, восстановленных рабочих поверхностей, дефектных ГБЦ, были вырезаны образцы круглой формы диаметром 50 мм и толщиной 5 мм из дефектной ГБЦ, а затем на них нанести порошковый материал методом газодинамического напыления (установка ДИМЕТ-404).

Перед напыление поверхность была очищена от загрязнений алюмосодержащим электроэрозионным ПМ, полученным разработанным способом (патент РФ № 2664149) электроэрозионного диспергирования алюминиевых отходов в воде дистиллированной при следующих параметрах установки: ёмкость разрядных конденсаторов 65 мкФ, напряжение 90 В, частота импульсов 60 Гц.

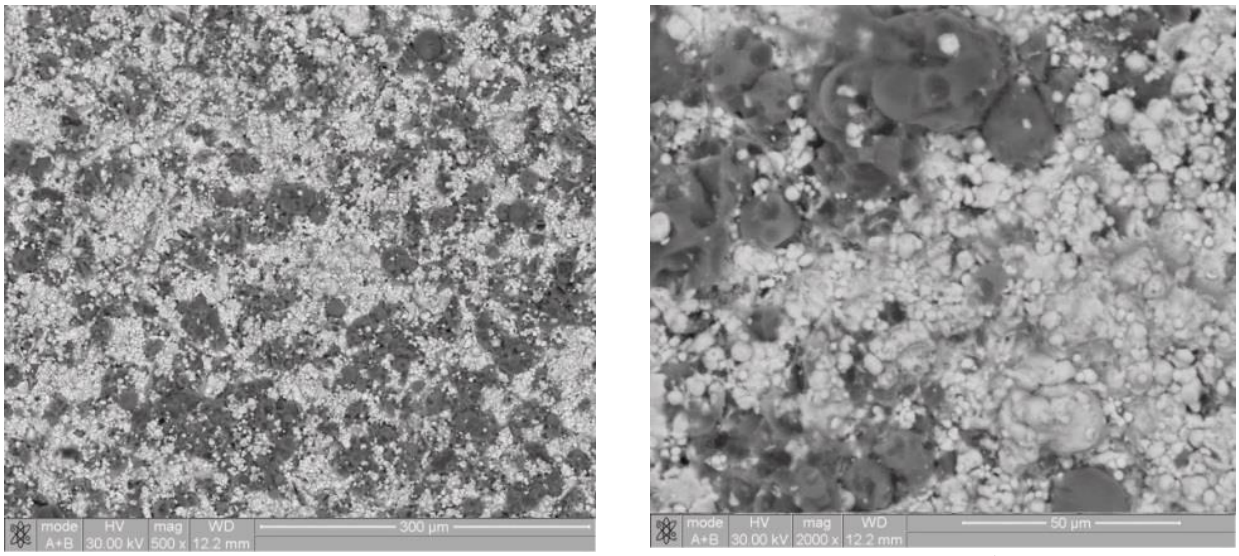
Были получены два типа образцов:

1. Образец со стандартным ПМ был получен методом газодинамического напыления с использованием стандартного порошка марки А-20-11.

2. Образец с экспериментальным ПМ был получен способом газодинамического напыления с использованием алюмосодержащего

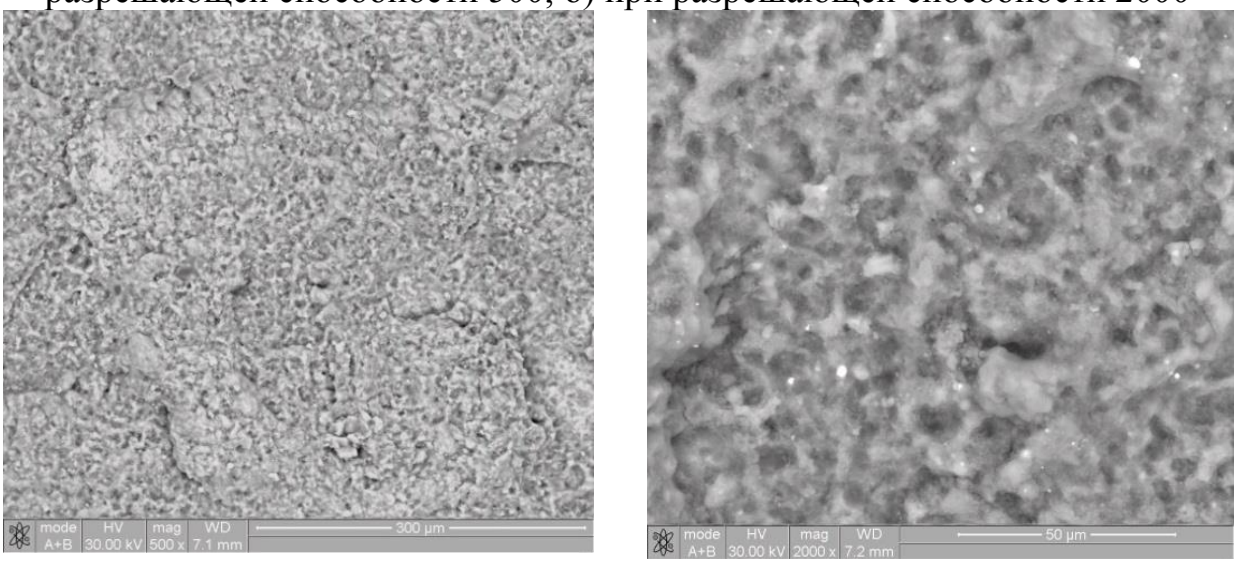
электроэрозионного ПМ, полученного разработанным способом (патент РФ № 2612117) получения порошковых материалов для восстановления дефектных головок блоков цилиндров газодинамическим напылением заключающийся в том, что отходы электротехнической алюминиевой проволоки, содержащие не менее 99,5% алюминия, подвергают электроэрозионному диспергированию в дистиллированной воде при частоте следования импульсов 95 … 105 Гц, напряжении на электродах 135 … 145 В и емкости разрядных конденсаторов 65 мкФ с последующим центрифугированием раствора для отделения крупноразмерных частиц порошкового материала от нанопорошка.

Результаты исследования микроструктуры и элементного состава, полученных покрытий представлены на рисунках 7-9 и в таблице2.



а) б)

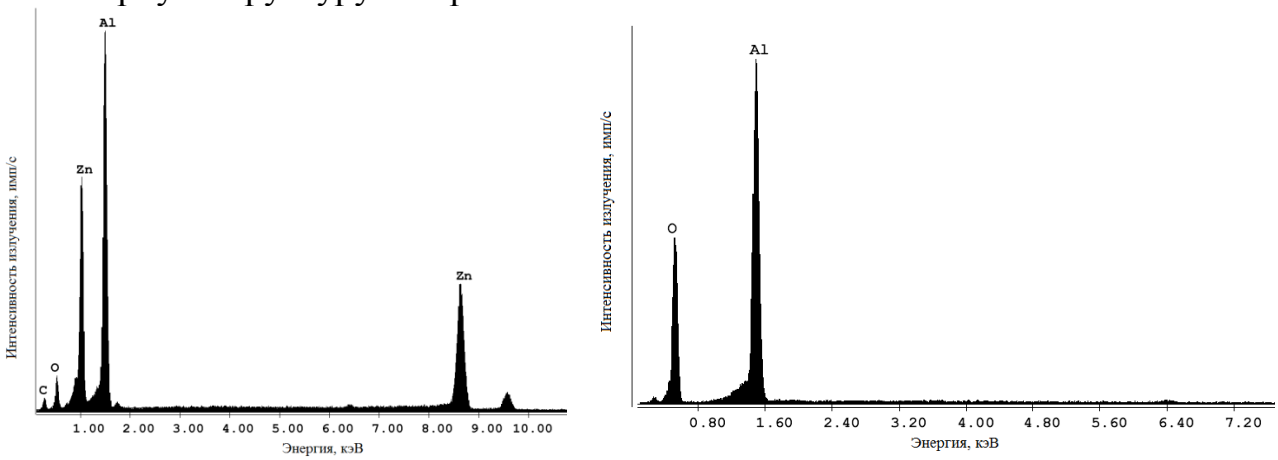
Рисунок 7 – Микроструктура образца со стандартным ПМ: а) при разрешающей способности 500; б) при разрешающей способности 2000



а) б)

Рисунок 8 – Микроструктура с экспериментальным ПМ: а) при разрешающей способности 500; б) при разрешающей способности 2000

Экспериментально установлено, что покрытие, полученное с использованием экспериментального алюмосодержащего ПМ, имеет более равномерную структуру и пористость на 20 % ниже.



а) б)

Рисунок 9 – РСМА образцов: а) со стандартным ПМ; б) с экспериментальным ПМ

Таблица 2 – РСМА газодинамического покрытия со стандартным ПМ (а) и экспериментальным ПМ (б)

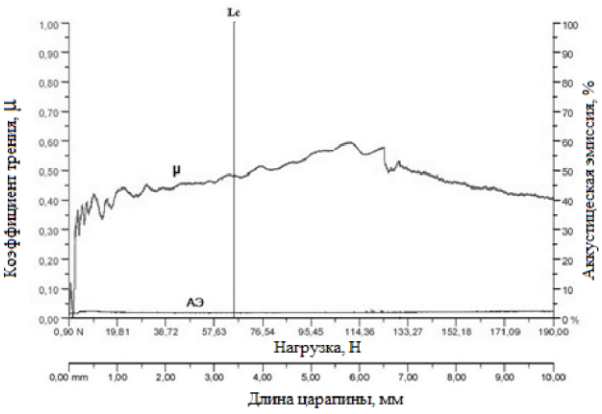
ПМ	Элемент	Массовая доля, %	Атомарная доля, %
а)	C	15,26	33,24
	O	7,58	12,39
	Al	41,28	40,01
	Zn	35,88	14,36
	Итого	100	100
б)	O	53,39	65,89
	Al	46,61	34,11
	Итого	100	100

Экспериментально установлено, что основными элементами покрытий с использованием стандартного ПМ марки А-20-11, являются Al, Zn, C и O, а основными элементами газодинамического покрытия, образца, полученного с использованием экспериментального алюмосодержащего ПМ, являются Al и O.

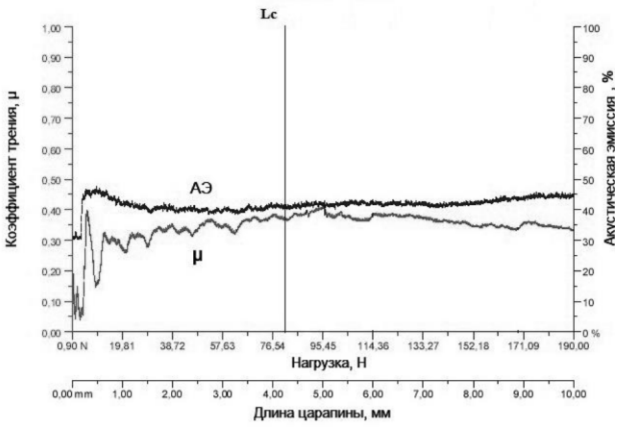
По результатам исследования твердости и адгезионной прочности газодинамических покрытий можно сделать выводы, что твердость покрытий с использованием электроэрозионного ПМ на 13 % выше, а адгезионная стойкость на 20 % выше, чем у покрытий, полученных с использованием стандартного порошкового материала марки А-20-11 (таблицы 3-4, рисунок 10)

Таблица 3 –Твердость образцов по Бринеллю

Образец	Твёрдость, HB
Со стандартным ПМ	94,3
С экспериментальным ПМ	107,2



а)



б)

Рисунок 10 – Зависимости изменения акустической эмиссии и коэффициента трения от приложенной нагрузки: а) образца со стандартным ПМ; б) образца с экспериментальным ПМ

Таблица 4 – Результаты адгезионных испытаний

Адгезионная прочность, МПа	Образец со стандартным ПМ	Образец с экспериментальным ПМ
Обозначение на рис. 10 – L_C	65,46 Покрытие истирается до подложки	81,39 Истирание покрытия до подложки не наблюдается
Примечание: при царапании покрытие на образце со стандартным ПМ истирается, но не отслаивается, то есть разрушаются по когезионному механизму, связанному с пластической деформацией и образованием усталостных трещин в материале покрытия		

Исследования коррозионной стойкости газодинамических покрытий на восстановленных ГБЦ из алюминиевых сплавов показали, что для образца со стандартным ПМ $E_{рц}$ снижается от - 994,99 до - 1029,4 мВ. Обычно снижение потенциала означает, что электролит проникает в покрытие. Когда электролит достигает подложки, формируется гальваническая пара и коррозия на границе «покрытие/подложка» может быть ускорена. В результате подложка может подвергнуться влиянию рабочего раствора и покрытие отслаивается. Растворение оксидов ведет к появлению дефектов, пор и трещин, облегчая проникновения электролита, и коррозия подложки происходит посредством атаки ионами хлорида, ведущей к питтинговой коррозии (рисунок 11).

В результате можно сделать вывод о том, что при погружении образцов с покрытиями на три часа в среду 3,5% NaCl потенциал разомкнутой цепи образца с экспериментальным ПМ на 22 % выше, что должно говорить о более стойкой к коррозионной среде структуре, чем у образца со стандартным ПМ.

Из изучения кривых зависимости тока от потенциала эффекта пассивации для всех изученных покрытий выявлено не было.

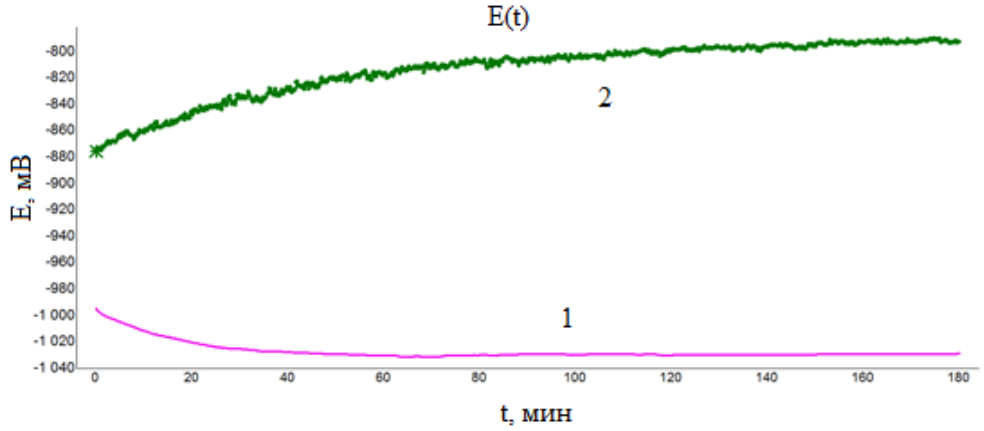


Рисунок 11 – Потенциал $E_{рц}$: 1 – образец со стандартным ПМ; 2 – образец с экспериментальным ПМ

Расчет экономической эффективности внедрения технологического процесса восстановления ГБЦ с аварийными дефектами в виде трещин между седлами клапанов и газовой эрозии выполнен на примере ГБЦ для двигателя ЗМЗ – 406 с годовой программой 70 шт. ГБЦ ДВС в год.

Экономический эффект от внедрения предложенного технологического процесса восстановления ГБЦ ДВС автомобиля методом ГДН в ООО «КСТ» составил 1049965 руб.

Экспериментально установлено, что стоимость восстановленной дефектной ГБЦ с применением экспериментальных порошковых материалов в 10 раз ниже стоимости новой ГБЦ.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена важная научно-практическая задача, направленная на совершенствование на основе научных исследований технологии восстановления дефектных деталей автомобилей путем применения газодинамических покрытий на основе алюмосодержащих электроэрозионных материалов, обеспечивающая требуемые эксплуатационные свойства. Методом газодинамического напыления с применением электроэрозионных порошковых материалов можно восстанавливать широкую номенклатуру автомобильных деталей из алюминиевых сплавов, а также наносить защитные (антикоррозионные) покрытия.

1. Теоретически и экспериментально подтверждена высокая эффективность применения новых порошковых алюмосодержащих материалов для восстановления дефектных головок блоков цилиндров из алюминиевых сплавов ДВС автомобилей.

2. Экспериментально установлено, что рабочие характеристики газодинамических покрытий, полученных с использованием электроэрозионного алюмосодержащего порошкового материала выше, чем характеристики газодинамических покрытий, полученных с использованием

стандартного алюмосодержащего порошкового материала марки А-20-11, а именно:

– твердость увеличивается на13 %;

– адгезионная стойкость возрастает на 20 %;

– коррозионная стойкость увеличивается на 22 %.

3. Разработан и запатентован способ получения порошковых материалов для восстановления дефектных головок блоков цилиндров газодинамическим напылением заключающийся в том, что отходы электротехнической алюминиевой проволоки, содержащие не менее 99,5% алюминия, подвергают электроэрозионному диспергированию в дистиллированной воде при частоте следования импульсов 95 … 105 Гц, напряжении на электродах 135 … 145 В и емкости разрядных конденсаторов 65 мкФ с последующим центрифугированием раствора для отделения крупноразмерных частиц порошкового материала от нанопорошка.

4. Проведены комплексные исследования процесса электроэрозионного диспергирования алюмосодержащих отходов, позволившие прогнозировать свойства электроэрозионного алюмосодержащего порошкового материала, а именно его форму и морфологию, гранулометрический, рентгеноспектральный и фазовый составы. Установлено, что с увеличением напряжения на 10 В и частоты следования импульсов на 90 ГЦ средний размер частиц уменьшается на 30 %, а фазовый состав изменяется от Al_2O_3 до Al.

5. Разработана технология восстановления дефектных ГБЦ, двигателей ЗМЗ-406 ГДН, с использованием ПМ, полученных из отходов Al, позволяющая обеспечить ресурс более 90% от ресурса новой детали. Эксплуатационные испытания показали, что при пробеге автомобиля «ГАЗель» в 116400 км на рабочей поверхности головки блока цилиндров, восстановленной газодинамическим напылением электроэрозионных алюмосодержащих порошковых материалов, дефектов и отслоения покрытия не наблюдается.

6. Обоснованность теоретико-методологических положений и полученных результатов работы, их научная, практическая и экономическая значимости подтверждаются апробацией разработок на авторемонтных предприятиях и в учебном процессе. Разработанные технологии и оборудование апробированы в ООО «КСТ» г. Курск. Расчетный экономический эффект составил порядка 1049965 рублей за 1 год.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих печатных работах:

- в рецензируемых научных журналах из «Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» ВАК:

1. Ageev, E.V. Size distribution of powdered aluminium sample microparticles produced using electroerosion dispersion / E.V. Ageev, E.P. Novikov, A.Y. Altukhov, V.P. Tikhomirov // 2015 International Conference on Mechanical

Engineering, Automation and Control Systems (MEACS), Tomsk, 2015, pp. 1-4.(Scopus).

2. Агеев, Е.В. Совершенствование технологии восстановления головок блока цилиндров путем применения порошковых электроэрозионных материалов / Е.В. Агеев, **Е.П. Новиков**, И.П. Емельянов // Мир транспорта и технологических машин. 2016. № 4 (55). С. 33-39.

3. **Новиков, Е.П.** Устранение дефектов ГБЦ путем газодинамического напыления рабочих поверхностей / Е.П. Новиков, Е.В. Агеев // Мир транспорта и технологических машин. – 2017. – № 4 (59). С. 38-44.

4. Агеев Е.В. Прочностные характеристики газодинамических покрытий на головках блоков цилиндров, полученных порошковыми электроэрозионными материалами / Е.В. Агеев, **Е.П. Новиков**, А.Н. Новиков // Мир транспорта и технологических машин. – 2018. – № 1 (59). – С. 35-42.

- статьи в сборниках материалов научных конференций:

5. **Новиков, Е.П.** Методы переработки алюминиевых отходов автомобильного производства / Е.П. Новиков // Будущее науки – 2015 : сб. науч. ст. 3-й Междунар. науч.-практ. конф. в 2 томах: Т. 2. Курск, 2015. С. 287–293.

6. **Новиков, Е.П.** К вопросу о переработке алюминиевых отходов электроэрозионным диспергированием / Е.П. Новиков, Е.В. Агеев, А.Д. Сытченко // Современные материалы, техника и технологии. – 2015. – №1. С. 168-173.

7. **Новиков, Е.П.** Перспективный метод переработки алюминиевых отходов с целью повторного использования порошков для восстановления деталей автомобилей / Е.П. Новиков // Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса: матер. 5-ой Междунар. науч.-практ. конф. Орел, 2016. С. 24-29.

8. **Новиков, Е.П.** Восстановление дефектных головок блоков цилиндров автомобильных двигателей с применением алюминиевых электроэрозионных материалов / Е.П. Новиков, А.С. Осьминина // Молодежь и системная модернизация страны: сб. науч. ст. Междунар. науч. конф. в 2 томах: Т 2. Курск, 2016. С. 239–243.

9. **Новиков, Е.П.** Подготовка корпусных дефектных деталей к восстановлению наплавкой и напылением с использованием алюминиевых электроэрозионных материалов / Е.П. Новиков, Г.Р. Латыпова, Е.В. Агеева // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ- 2016): сб. ст. VIII Междунар. науч.-техн. конф. Курск, 2016. С. 255–259.

10. **Новиков, Е.П.** Основные дефекты головок блоков цилиндров автомобильных двигателей и методы их восстановления с использованием электроэрозионных материалов / Е.П. Новиков, Г.Р. Латыпова, М.А. Зубарев // Перспективное развитие науки, техники и технологий: сб. науч. ст. 6-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск, 2016. С. 81-85.

11. **Новиков Е.П.** Рентгеноспектральный микроанализ восстановленной головки блока цилиндров методом газодинамического напыления / Е.П.

Новиков, Е.В. Агеев // Молодежь и наука: шаг к успеху: сб. науч. ст. 2-й Всерос. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых. В 3-х томах. Т.3 – Курск¬ 2018. С. 273-277.

12. **Новиков Е.П.** Исследование микроструктуры восстановленной ГБЦ методом газодинамического напыления с использованием электроэрозионных материалов / Е.П. Новиков, Е.В. Агеев // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации.: сб. науч. тр. XIII-ой Межд. науч.-практ. конф.– Курск¬ 2018. С. 151-155.

13. **Новиков Е.П.** Исследование элементного состава восстановленной ГБЦ методом газодинамического напыления с использованием электроэрозионных материалов / Е.П. Новиков, Е.В. Агеев // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации.: сб. науч. тр. XIII-ой Межд. науч.-практ. конф.– Курск¬ 2018. С. 148-151.

- монография:

14. Агеев, Е.В. Применение алюминиевых электроэрозионных материалов для газодинамического напыления дефектных автомобильных деталей: монография / Е.В. Агеев, А.В. Щербаков, **Е.П. Новиков.** Курск: Университетская книга, 2017. 166 с.

- патенты на изобретения:

15. Пат. 2612117 РФ. Российская Федерация, МПК B22F 9/14, C22B 7/00, C22B 21/00, B82Y 30/00. Способ получения алюминиевого нанопорошка / Е.В. Агеев, Е.П. Новиков, Е.В. Агеева // заявитель и патентообладатель Юго-Зап. гос. ун-т. – № 2015144702; заявл. 19.10.2015; опубл. 02.03.2017, Бюл. № 17.

16. Пат. 2664149 РФ. Российская Федерация, МПК C01F 7/42, B22F 9/14, C04B 35/622, C04B 35/10, C30B 30/02, C30B 29/20, B01J 19/08, B23H 1/00. Способ получения мелкокристаллического корунда / Новиков Е.П., Агеев Е.В., Агеева Е.В., Алтухов А.Ю. // заявитель и патентообладатель Юго-Зап. гос. ун-т. – № 2016110004; заявл. 21.03.2016; опубл. 18.08.2018, Бюл. № 23.

- в прочих изданиях:

17. **Новиков, Е.П.** Изучение формы и морфологии порошка, полученного из отходов алюминия методом электроэрозионного диспергирования / Е.П. Новиков, Е.В. Агеева, Д.А. Чумак-Жунь //Известия Юго-Западного государственного университета. Серия техника и технологии. – 2015. – №4 (17). – С. 13-17.

18. **Новиков, Е.П.** Технология переработки алюминиевых деталей автомобилей до микро и нанофракций / **Е.П. Новиков**, Е.В. Агеев, А.Ю. Алтухов // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе. – 2015. – Вып. 2. С. 328-333.

19. Агеев, Е.В. Восстановление головок блоков цилиндров двигателей автотракторной техники алюминиевыми электроэрозионными материалами / Е.В. Агеев, **Е.П. Новиков** // Труды ГОСНИТИ. – 2016. – Т. 124. Ч. 2. С. 20-27.

20. Агеева, Е.В. Рентгеноструктурный анализ алюминиевого электроэрозионного порошка, полученного в дистиллированной воде / Е.В.

Агеева, **Е.П. Новиков**, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2016. – №5 (68). – С. 8-13.

21. Латыпов, Р.А. Исследование алюминиевого порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования в дистиллированной воде/ Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, **Е.П. Новиков** // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2016. – № 4. С. 19-22.

22. **Новиков, Е.П.** Применение алюминиевых электроэрозионных материалов ультра и нанофракций / Е.П. Новиков, А.Ю. Алтухов, Е.В. Агеев // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. – 2016. – Т. 3. № 2. С. 52-54.

23. Латыпов Р.А. Изучение технологических свойств алюминиевого порошка, полученного электроэрозионным диспергированием в воде / Р.А. Латыпов, В.И. Саитов, Е.В. Агеев, **Е.П. Новиков** // Международный технико-экономический журнал. – 2017. – № 6. С. 65-71.

24. Агеева, Е.В. Сравнительный рентгеноструктурный анализ газодинамических покрытий головок блоков цилиндров / Е.В. Агеева, **Е.П. Новиков**, Н.А. Пивовар // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2018. – № 1 (76). С. 78-85.

25. Агеев, Е.В. Исследование покрытий восстановленной ГБЦ двигателя ЗМЗ-406, полученных газодинамическим напылением / Е.В. Агеев, **Е.П. Новиков**, В.А. Денисов // Технический сервис машин. – 2018. – Т. 131. С. 151-159.

26. Агеева Е.В. Исследование на устойчивость к воздействию температуры головки блока цилиндров, восстановленной газодинамическим напылением электроэрозионных порошков / Е.В. Агеева, **Е.П. Новиков**, А.С. Осьминина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия техника и технологии. – 2018. – Том. 8, №4 (29). – С. 15-23.

Подписано в печать 07 мая 2019 г. Формат 60x84 1/16.
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 14.
Юго-Западный государственный университет
305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94