ФГБОУ ВО ЮГО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

НОВИКОВ ЕВГЕНИЙ ПЕТРОВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГОЛОВОК БЛОКОВ ЦИЛИНДРОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Специальность 05.22.10 Эксплуатация автомобильного транспорта

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент Агеева Е.В.

Курск – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ…… 5

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ……... 11

1.1. Анализ дефектов головок блоков цилиндров……... 13

1.2. Классификация способов восстановления дефектных головок блоков цилиндров…….. 19

1.3. Основные способы порошкового напыления……... 22

1.3.1. Способ газодинамического напыления…….. 28

1.4. Материалы, используемые для газодинамического напыления……. 31

1.5. Выводы к главе 1……..... 35

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕФЕКТНЫХ ГОЛОВОК БЛОКОВ ЦИЛИНДРОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ……... 38

2.1. Физические основы способа газодинамического напыления дефектных головок блоков цилиндров……. 38

2.2. Выводы к главе 2……..... 47

ГЛАВА 3 МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ……... 48

3.1. Методика получения электроэрозионного порошкового материала из отходов алюминия…….. 48

3.2. Методика исследования гранулометрического состава электроэрозионного порошкового материала из алюминия……. 55

3.3. Методика исследования формы и морфологии частиц электроэрозионного порошкового материала из алюминия…….. 58

3.4. Методика проведения рентгеноспектрального микроанализа частиц электроэрозионного порошкового материала из алюминия…….. 60

3.5. Методика проведения рентгеноструктурного анализа электроэрозионного порошкового материала из алюминия……. 63
3.6. Методика напыления дефектных головок блока цилиндров……... 65
3.7. Методика исследования влияние параметров восстановления дефектных головок блоков цилиндров на пористость газодинамических покрытий……. 71
3.8. Методика исследования микроструктуры и рентгеноспектрального микроанализа, газодинамических покрытий…… 72
3.9. Методика исследования твердости и адгезионной прочности газодинамических покрытий……. 73
3.10. Методика исследования рентгеноструктурного микроанализа газодинамических покрытий……. 75
3.11. Методика исследования коррозионной стойкости газодинамических покрытий……. 76
3.12. Методика исследования на устойчивость к воздействию температуры газодинамических покрытий…….. 79
3.13. Выводы к главе 3……..…. 81
ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ……... 83
4.1. Результаты исследования гранулометрического состава электроэрозионного порошкового материала из алюминия…….. 83
4.2. Результаты исследования формы и морфологии частиц порошкового материала из алюминия…….. 89
4.3. Результаты исследования рентгеноспектрального микроанализа частиц порошкового материала из алюминия……. 93
4.4. Результаты исследования рентгеноструктурного анализа порошкового материала из алюминия…….. 95
4.5. Влияние параметров восстановления дефектных головок блоков на пористость газодинамических покрытий……. 97

4.6. Постановка факторного эксперимента с целью определения оптимальных параметров восстановления дефектных головок блоков цилиндров..... 105
4.7. Результаты исследования микроструктуры и рентгеноспектрального микроанализа газодинамических покрытий….. 112
4.8. Результаты исследования рентгеноструктурного микроанализа газодинамических покрытий……. 118
4.9. Результаты исследования твердости и адгезионной прочности газодинамических покрытий……. 120
4.10. Результаты исследования коррозионной стойкости газодинамических покрытий……. 127
4.11. Результаты исследования на устойчивость к воздействию температуры газодинамических покрытий…….. 130
4.12. Результаты эксплуатационных испытаний……. 132
4.13. Технологические рекомендации по восстановления дефектных головок блока цилиндров двигателя ЗМЗ – 406…… 134
4.14. Реализация результатов исследований и их технико-экономическая оценка……. 137
4.15 Выводы к главе 4…… 142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ……. 145
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ…….. 145
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ……... 147
ПРИЛОЖЕНИЯ……..... 161

ВВЕДЕНИЕ

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 [78] (ГДН). Одной из проблем использования технологии [78] 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 [78] 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 разработанности темы. 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. Коло-

мейченко, 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.

Научная новизна диссертационной 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 диспергирова-

ем 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.

Итоги исследований проведенных в диссертационной работе используются в учебном процессе, в процессе чтения лекций, написании курсовых, а также лабораторных работ с аспирантами и студентами 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.

Объект исследования – ГБЦ из алюминиевых сплавов двигателей автомобилей.

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

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.); «Автомо-

били, 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.

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 (приложение А) и № 2664149 (приложение Б) и получен 1 приоритет на получение патента на изобретение РФ.

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.

ГЛАВА 1

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Опираясь на экспериментальные данные выполненных исследований ремонтного фонда в ГОСНИТИ автомобильных деталей, которые направляются на ремонтные работы, было установлено, что более 20 % автомобильных деталей необходимо утилизировать, 25 – 40 % автомобильных деталей можно использовать без проведения ремонтных работ, а с оставшимися 40 – 55 % автомобильными деталями необходимо производить восстановительные работы [1].

Если автосервисное учреждение будет использовать современными способами проведения дефектовочных работ, а также способов восстановления дефектных автомобильных деталей, то количество автомобильных деталей, которые нужно утилизировать можно существенно уменьшить[15].

Технологические процессы восстановления дефектных автомобильных деталей являются [15] наиболее масштабными из резервного фонда экономии при проведении работ по ремонту автомобильных двигателей в том числе и ГБЦ [1-15].

В процессе восстановления дефектных автомобильных деталей следует гарантировать нормативные характеристики функциональных и ресурсных показателей. Ресурсные показатели демонстрируют уровень возобновления технологического ресурса, а функциональные – демонстрируют надежность детали. В процессе возобновления ресурса ГБЦ с дефектами, следует довести вплоть до нормативных характеристик данные показатели:

– шероховатость привалочной плоскости головки блока цилиндров и точность всех размеров;

– износостойкость привалочной плоскости головки блока цилиндров;

– коррозионную стойкость поверхности ГБЦ;

– адгезионную прочность отремонтированной области ГБЦ;

– конструкцию компонентов и точность обоюдного взаиморасположения;

– устойчивость к влиянию перепада температуры.

Каждый из этих показателей является одним из показателей, который определяет качество процесса восстановления дефектной головки блока цилиндров.

Для того чтобы плоскость дефектной головки блока цилиндров находилась в чистом виде, следует осуществить очистку от загрязнений (эксплуатационных и технологических). Более сложным технологическим процессом оказывается очищение плоскости ГБЦ от прочносцепленных рабочих загрязнений, таких как нагар и накипь.

В момент оценки качества следует определить соотношение полученных показателей характеристик восстанавливаемой головки блока цилиндров их показателям, которые введены в нормативной документации. Делая упор на сравнение данных, делают заключение о пригодности головки блока цилиндров к эксплуатации.

Основываясь на показанной информации можно отметить, что процесс восстановление дефектных ГБЦ содержит технологические операции по чистке головок блоков цилиндров, установлению технических параметров, утверждению заключения о восстановлении ГБЦ, формирование покрытий с припуском на восстанавливаемых плоскостях для последующей механической и термической обработки.

Ключевые задачи в процессе восстановлении рабочих характеристик автомобильных деталей состоят в гарантировании правильных размеров и режимов работы автомобильной детали в соответствии с продолжительностью предусмотренной нормативными документами [15].

В процессе эксплуатации на головках блоков цилиндров образуются различные виды дефектов, а именно:

– коробление плоскости прилегания к блоку цилиндров;

– трещины по всех плоскости;

– прослабление посадки седел клапанов;

– изнашивание отверстий в направляющих втулках, а также резьбы.

В настоящее время одним из перспективных способов восстановления [78] дефектных деталей автомобилей является газодинамическое напыление. Одной из проблем использования технологии [78] ГДН является качество применяемых порошковых материалов. Одними из перспективных и промышленно не применяемых являются порошковые материалы, получаемые из токопроводящих отходов [76] электроэрозионным диспергированием. Однако, эти материалы не применялись до настоящего времени в технологиях восстановления дефектных деталей автомобилей газодинамическим напылением, в том числе и головок блока цилиндров [78].

1.1 Анализ дефектов головок блоков цилиндров

Для проведения экспериментальных исследований с целью восстановления дефектных автомобильных деталей способом газодинамического напыления с применением алюмосодержащих порошковых материалов была использована головка блока цилиндров (ГБЦ) двигателя ЗМЗ – 406 (рисунок 1.1). Выбранный двигатель имеет обширную популяризацию не только на территории Курской области, но и по всей России. Главными его достоинствами являются простота конструкции, высокая надежность в эксплуатации и ремонтопригодность [15].

Рисунок 1.1 – Головка блока цилиндров автомобильного двигателя ЗМЗ-406

На автомобильном двигателе ЗМЗ-406 были впервые установлены: четыре клапана на цилиндр, гидротолкатели, двухступенчатый цепной привод двух распределительных валов, а также электронная система контроля зажигания и впрыска топлива [15,117].

После поставки ГБЦ на автомобильный двигатель возникает ее нагружение силами первоначальной затяжки, головка блока цилиндров принимает и передает на болты силы и напряжения, которые развиваются газами. На ГБЦ появляются существенные усилия и деформации посредством воздействия термической нагрузки, преимущественно по причине непостоянного нагрева ее единичных компонентов. В форсированных двигателях в ГБЦ температурные усилия имеют возможность в несколько раз превосходить механические. Учитывая неравномерный нагрев привалочной плоскости ГБЦ есть вероятность появления трещин и прогаров в перемычках между клапанными гнездами, они могут образовываться из-за неправильной работы системы охлаждения. Вследствие значительных тепловых перегрузок в ГБЦ может происходить потеря герметизация газового стыка и клапанов.

Исходя из эксплуатационных характеристик конструктивные параметры ГБЦ должны соответствовать данным условиям:

– гарантировать подходящую конструкцию выпускных и впускных каналов;

– формировать прочное уплотнение газового стыка;

– формировать объем камеры сгорания заданной конфигурации, который соответствует методу распределения рабочей технологии;

– контролировать процесс перемещения охлаждающей жидкости, который будет обеспечивать минимальную тепловую напряженность поверхности ГБЦ во время работы;

– гарантировать оптимальное расположение нужных деталей автомобильного ДВС, которые прикрепляются на головку блока цилиндров.

Головки блока цилиндров производится в виде единообразной отливки. Она может быть изготовлена как для нескольких цилиндров автомобильного двигате-

ля, так и персонально для одного цилиндра автомобильного двигателя.

С целью увеличения надежности газового стыка и сокращения вероятности возникновения коробления клапанных седел делают более объемной нижнюю опорную стенку ГБЦ со стороны плоскости прилегания к блоку цилиндров[10].

С целью уменьшения высоких температур во время работы ДВС в ГБЦ проделывают конструкцию полостей и каналов, чтобы охлаждающая жидкость имела возможность подбираться к наиболее нагретым участкам и отводить тепло. В ГБЦ изготовленных из чугуна температура плоскости камеры сгорания может повышаться до 350 °С, при этом изменение значений температур меж единичными местами может составлять до150°С. В ГБЦ изготовленных из алюминиевых сплавов, которые имеют высокие значения теплопроводности, максимальные значения температур, а также изменений температур значительно ниже. Производство ГБЦ из алюминиевого сплава способствует значительному увеличению количества отводимой теплоты, а следовательно не дает возможности проявлению детонации в автомобильном двигателе [10].

Фактически все важные действия в ДВС, выполняются непосредственно с помощью ГБЦ. На головке блока цилиндров закрепляются все детали, которые приводят в рабочее состояние кривошипно-шатунный механизм. ГБЦ также обеспечивает защиту данных компонентов от внешних влияний. Во внутренней части ГБЦ размещаются камеры сгорания, в них осуществляется сжатие, а также воспламенение смеси [15,117].

ГБЦ с деталями клапанного механизма работает в очень тяжелых условиях – при высоких температурах и под воздействием механических и тепловых нагрузок. Поэтому необходимо для нее правильно выбрать способ ремонта в зависимости от дефекта и места его расположения.

Головка блока цилиндров относятся к корпусным деталям автомобиля, корпусные автомобильные детали производятся чаще всего из чугуна СЧ15, СЧ18, СЧ24, а также алюминиевого сплава марок АК-7, АК-9 и др. [2, 16-20].

Автомобильные детали, относящиеся к классу корпусных деталей, в совокупности имеют вероятность обладать механическими повреждениями (обломы болтов и шпилек, трещины, пробоины, срыв резьбы и др.), разрушение посадочных плоскостей под втулки и подшипники, коробление, износ рабочих плоскостей с перемещающимися посадками.

При этом для поиска неисправностей целесообразно применять дефектацию, которая будет представлять собой процесс технического контроля ГБЦ, имеющих пробег, для установления их пригодности с целью последующего восстановления способом газодинамического напыления.

Главной целью дефектовочных работ является отсеивание от попадающих на сборку ГБЦ, исчерпавших свой ресурс, а также отсутствие выбраковки пригодные к эксплуатации без ремонтных работ головок блоков цилиндров.

К появлению дефектов приводит: погрешности конструирования; неправильный порядок технического процесса производства; несвоевременное техническое обслуживание; некачественные ремонтные работы, грубая эксплуатация.

При дефектации необходимо определять несоответствие геометрической конфигурации привалочной плоскости ГБЦ, несоответствие их размерных характеристик значениям чертежа, нарушение взаимного месторасположения компонентов, физико-механических качества покрытия и др.

Контроль ГБЦ необходимо выполнять в соответствии с техническими условиями в соответствующей последовательности.

Первостепенно необходимо контролировать дефекты, согласно которым ГБЦ наиболее часто подлежит утилизации. В случае если на ГБЦ присутствуют соответствующие дефекты, а их значение отвечает значениям выбраковки, то соответственно оставшиеся дефекты ГБЦ не рассматриваются.

При этом у автомобильной детали могут быть допустимые, предельные и выбраковочные размеры, а также другие технические характеристики.

При этом можно выделить некоторые группы дефектов, которые относятся к автомобильным деталям в целом:

– несоблюдение целости (обломы, трещины, разрывы);

– расхождение формы и объемов деталей;

– сочетание различных видов дефектов.

На выбор технологического процесса восстановления дефектных автомобильных деталей существенное влияние оказывает размер дефекта. Можно выделить 3 группы размеров дефектов:

1 группа – дефекты до 0,5 мм;

2 группа – дефекты от 0,5 мм до 2 мм;

3 группа – дефекты больше 2 мм.

Количественные показатели размеров дефектов имеют ключевое значение в момент установления несоответствий размеров и формы автомобильной детали.

Вероятность появления дефекта автомобильной детали оценивается в числовых значениях при обработке экспериментальных показателей и характеризуется коэффициентом повторяемости дефекта [2].

Детали произведенный из алюминиевых сплавов применяться практически на всех автомобилях, а в некоторых марках процент использования алюминиевых сплавов при производстве автомобиля достигает значения 80. Мировая промышленность, занимающаяся производством автомобилей и автомобильных деталей, использует в производстве свыше 5,0 млн. т. алюминиевых сплавов в год, это равняется около 20% производства алюминия во всем мире [16].

Головка блока цилиндров автомобильного ДВС вместе с цилиндром создает надпоршневую область, в данной области формируются все процессы рабочего цикла двигателя. ГБЦ выполняет работу связанную с впуск горючей смеси, сжатие рабочей смеси, а также выпуск отработавших газов. Если головка блока цилиндров работает не правильно, то происходит нарушение работы двигателя и автомобиля в целом и снижение значений показаний мощности вплоть до 30% [54].

Чаще всего утрата рабочих характеристик головки блока цилиндров проявляется при невыполнении технических рекомендаций завода изготовителя[54]. Ресурсные показатели головки блока цилиндров в эксплуатационных условиях

значительно меньше нормативных значений. Так, например, капитальный ремонт ГБЦ автомобильного двигателя ЗМЗ-406 следует выполнять при значении пробега от 150 тыс. км. до 170 тыс. км, но, в большинстве случаев, ГБЦ требуются ремонтные работы при значении пробега от 80тыс. км. до 100 тыс. км.

Анализ повреждений ГБЦ на двигателях семейства ЗМЗ выявил, что наблюдаются более 10 повреждений вида прогара привалочной плоскости и газовой эрозии, забоин, рисок и сколов, которые появляются с периодичностью менее 0,05 (рисунок 1.2, таблица 1.1) [6,7]. Имеющимися способами ликвидации подобных повреждений зачастую игнорируют вследствие невысокой производительности либо высокой цены ремонта. Если выявляются такие дефекты то ГБЦ обычно подлежит выбраковке и замене на новую. Появление данных видов дефектов приводит к утрате эксплуатационных характеристик ДВС и простою техники.

Таблица 1.1 – Основные аварийные дефекты ГБЦ и способы их устранения

№	Наименование дефекта	Коэфф. повтор. дефекта	Основной способ устранения	Альтернативный
1	Наличие нагара и накипи на поверхности	1,0	Очистка головки цилиндров от нагара в установке с раствором солей	Абразивная очистка ПМ
2	Трещины на перемычке между клапанными гнездами	0,27	Заделка трещин постановкой стягивающей вставки	Газодинамическое напыление алюмосодержащими ПМ
3	Коробление поверхности прилегания к блоку	0,18	Шлифовать поверхность прилегания к блоку выведения отклонения от плоскости	
4	Коррозионный износ, газовая эрозия и прогар привалочных поверхностей	0,03…0,04	Браковать	Газодинамическое напыление алюмосодержащими ПМ

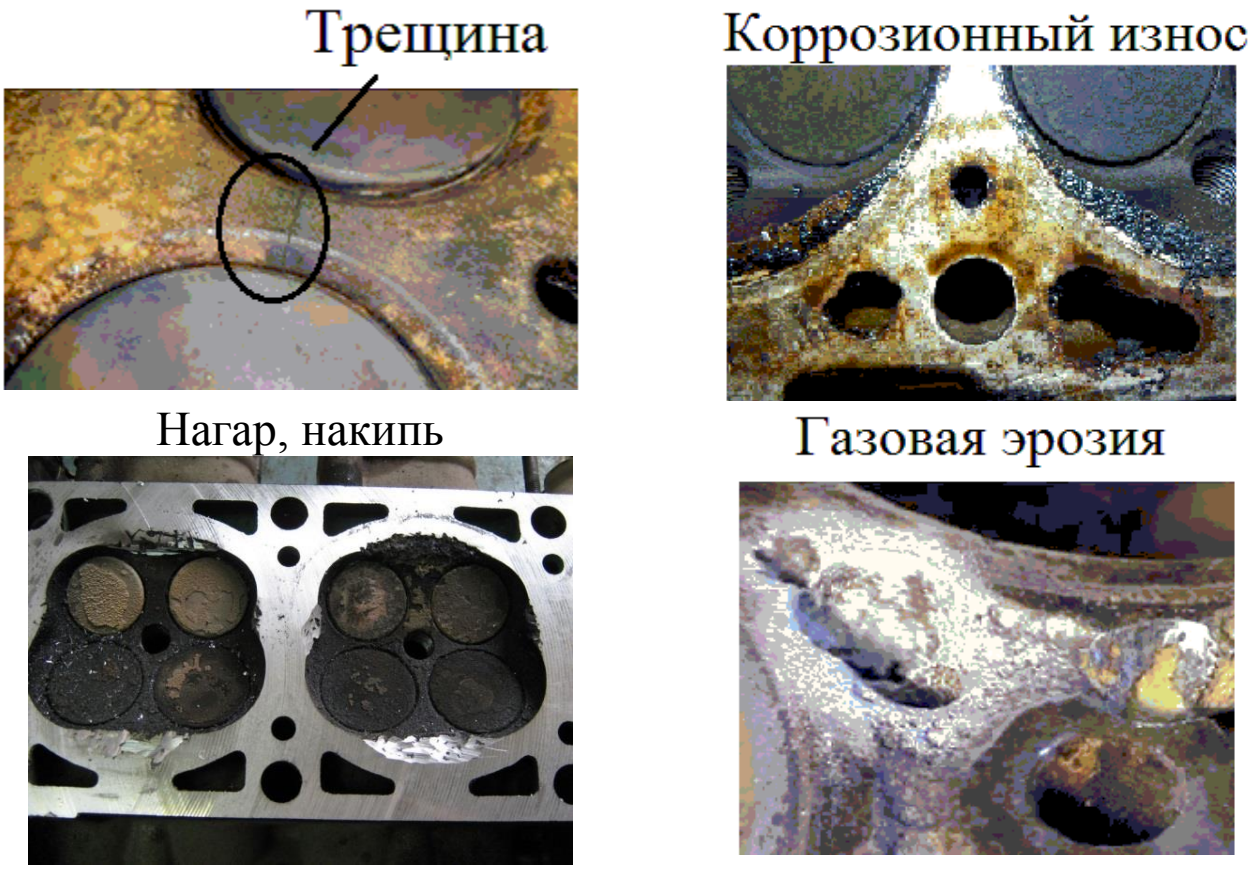


Рисунок 1.2 – Основные дефекты ГБЦ из алюминиевых сплавов

1.2 Классификация способов восстановления дефектных головок блоков цилиндров

Технологии восстановления деталей относятся к разряду наиболее ресурсосберегающих, так как по сравнению с изготовлением новых деталей сокращаются затраты (на 70 %). Основным источником экономии ресурсов являются затраты на материалы. Средние затраты на материалы при изготовлении деталей составляют 38%, а при восстановлении – 6,6% от общей себестоимости. Все это в полной мере относится к двигателям внутреннего сгорания [78] (ДВС), в том числе и к головкам блока цилиндров [78] (ГБЦ).

Высокое качество восстановления автомобильных деталей имеет возможность осуществляться действиями работников зон по ремонту агрегатов, а также

инженерных сотрудников. Следует обеспечить, чтобы сотрудники, которые занимаются ремонтными работами с оборудованием и автомобилями, располагали сведениями не только лишь о предназначении, конструктивных особенностях, дефектах деталей и износе, но и в совершенстве владели способами и приемами сварки и наплавки, нанесения газотермических, гальванических покрытий, пластического деформирования, механической, термической и упрочняющей обработки [18-26].

Проведенный обзор способов восстановления автомобильных деталей показал, что более 70 % дефектных автомобильных деталей восстанавливаются наплавкой, сваркой и напылением. Следовательно, очень важно детальнее разобраться со всеми из данных способов и сделать выбор в пользу наиболее продуктивного для возобновления утраченных характеристик дефектных ГБЦ.

Большинство применяемых способов восстановления ГБЦ обладают как положительные, так и отрицательные качествами, которые сдерживают их использовании в технологиях по восстановлению дефектных ГБЦ. Основными недостатками способов сварки и наплавки является то, что деталь подвергается высоким термическим деформациям, наличие легирующих элементов и вспенивание металла сварного шва могут привести к короблению и образованию скрытых дефектов, что ограничивает их применение при восстановлении ГБЦ из алюминиевых сплавов.

Сварка и наплавка алюминиевых сплавов представляет собой достаточно трудоемкий процесс. Сваривание элементов из алюминиевых сплавов усложняется согласно последующим обстоятельствам:

– весьма недостаточная сплавляемость алюминиевого сплава вследствие создания в его поверхности тугоплавкой оксидной оболочки оксида алюминия;

– в процессе повышения температуры до значений от 400ºС до 450ºС алюминиевые сплавы в значительной мере утрачивают собственные показатели прочностных характеристик и автомобильная деталь имеет вероятность рассыпаться от удара незначительной силы либо от воздействия собственной массы сплава;

– высокая температура плавления оксида алюминия (2050 °С) и низкая температура плавления алюминия (658 °С) затрудняет управление процессом сварки;

– металл не имеет пластического состояния и при нагреве сразу переходит из твердого состояния в жидкое, поэтому возможна сварка только в нижнем положении;

– показатель прямолинейного расширения алюминиевых сплавов в 2 раза, а проводимость тепла в 3 раза выше, чем у сплавов из стали;

– При проникновении в расплавленный металл воздуха происходит выделение пор [27,28,29].

С целью уничтожения оксидной пленки с плоскости восстанавливаемой детали чаще всего применяют химическое связь с компонентами из числа галогенов. В окружающей среде существует большое количество химических сочетаний, которые в своем составе имеют галогены, однако с целью применения в области сварочного флюса элементы обладать низкой (600...700°С) температурой плавления. Данными параметрами характеризуются соли щелочно-земельных и щелочных металлов. Сварка с применением флюса имеет много положительных качеств. Однако ее нельзя применять в различных пространственных положениях. Тем более, по причине наличия остаточного флюса на поверхности коррозионные показатели шва становится ниже[19].

Автомобильные детали из алюминиевых сплавов, в том числе и ГБЦ восстанавливают газовой, дуговой и аргонодуговой сваркой. Перед сваркой обязательно производится обезжиривание поверхности растворителями и очищение от нагара, причем масла и грязи необходимо удалять не более чем за 2-4 ч до сварки.

Головка блока цилиндра изготовлена из алюминиевого сплава. Исходя из рассмотренных способов восстановления можно сделать вывод, что при восстановлении ее поверхности сваркой и наплавкой оказывается значительное термическое воздействие на поверхность и происходит термическая деформация. Поверхность ГБЦ должна быть идеально ровной, чтобы обеспечить хорошую герметичность в месте сопряжения с блоком цилиндров. Следовательно, более успешным процессом будет являться возобновление рабочих характеристик дефектных головок блоков цилин-

дров газодинамическим напылением с использованием алюмосодержащего порошкового материала. С этой целью следует провести обзор всех способов напыления и подобрать максимально оптимальный для автомобильных деталей изготавливаемых из алюминиевых сплавов, которые воспринимают коррозионное и термическое влияние в ходе эксплуатации.

1.3 Основные способы порошкового напыления

Из числа широкого класса способов получения покрытий и модификации плоскости дефектных ГБЦ существенное значение имеют способы порошкового напыления – плазменный, газопламенный, детонационный, а кроме того разновидности этих способов. Колоссальную общественную заинтересованность к данным способам можно разъяснить огромными перспективами, как по разновидностям напыляемых порошковых материалов, так и по возможности восстанавливать автомобильных детали различных вариантов размеров и форм.

Единым показателем для абсолютно всех газотермических способов напыления предоставляется то, что порошковый материал разогревается и приобретает значительное ускорение в газовом потоке с высокой температурой. При том на плоскости подложки порошковый материал, которым производится напыление, перемещается в разновидности не крупных расплавленных частиц, которые в момент ударения о подложку, подвергаются деформации, при этом происходит их закрепление с образованием неразрывного покрытия.

В способах получения покрытий из порошковых материалов вероятности регулирования кинетической энергии напыляемых частиц порошкового материала существенно урезаны. Усовершенствовать физико-механические свойства покрытий в данном варианте можно с помощью следующих операций:

– использование подслоев из металлических частиц;

– модернизация качественных показателей изначальной обработки плоскости подложки;

– формирование регулируемой окружающей среды с применением специализированной обработки покрытий;

– применение ультрадисперсных порошковых материалов и плазмотронов с большой мощностью, имеющих определенные габариты и строение сопел распыляющих порошковый материал;

– обогрев плоскости в ходе напыления;

– использование высокоэнтальпийных веществ;

– подогревом порошковых частиц, напыляемых на поверхность автомобильной детали.

Тем не менее, многочисленные научно-технические проблемы, которые появляются в процессе разработки новейших экземпляров техники, не смогут разрешиться с применением вышеуказанных способов порошкового напыления. Следовательно, исследование и создание новейших способов получения покрытий длится и сейчас [48].

Наиболее целесообразным способом совершенствования качественных показателей покрытий представляется развитие скоростных показателей соприкосновения порошковых частиц с плоскостью автомобильной детали. Одним успешно применяемых способов обладающих высокими скоростными показателями представляется способ детонационно-газового формирования покрытий [47].

В период течения детонационного напыления напыляемые порошковые частицы получают энергию в период перегорания и передвижения ацетиленокислородной смеси образной массы в стволе орудия. Детонация зарождается в первоначальный этап горения смеси, а затем разносится в трубе со скоростью от 2000 до 3000 м/с.

В процессе детонационного напыления показатели температуры горения смеси может возрастать до 5700 К, а кроме того формируется давление свыше 100 МПа. Быстрота полета порошковых частиц напыляемого порошка располага-

ется в промежутке от 600 до 800 м/с, а величина показателей температуры имеет возможность возрастать до 4000 К. Напыление обладает не высокой пористостью (0,5%), а кроме того большими значениями прочности сцепления (200 МПа) [47].

Установка для детонационного напыления состоит из охлаждаемого замкнутого с одного конца ствола длиной от 1200 до 2000 мм и диаметром от 8 до 40 мм (рисунок 1.3). Внутренняя часть ствола около торцовой стенки ограничивает камеру, в которой происходят взрывы. В ее стенке смонтировано запальный механизм, а также клапан, который осуществляет подачу окислительного и горючего газов. Порошковый питатель располагается в торцевой части ствола.

В процессе детонационного напыления используют металлические, композитные, оксидно-керамические порошковые материалы. Причем данные порошковые материалы не обязаны взаимодействовать с элементами сгорания. Средний размер напыляемых частиц должен находиться в пределах от 10 до 50 мкм. Детонационное напыление можно применять в процессе наращивания защитных, а также износостойких покрытий.

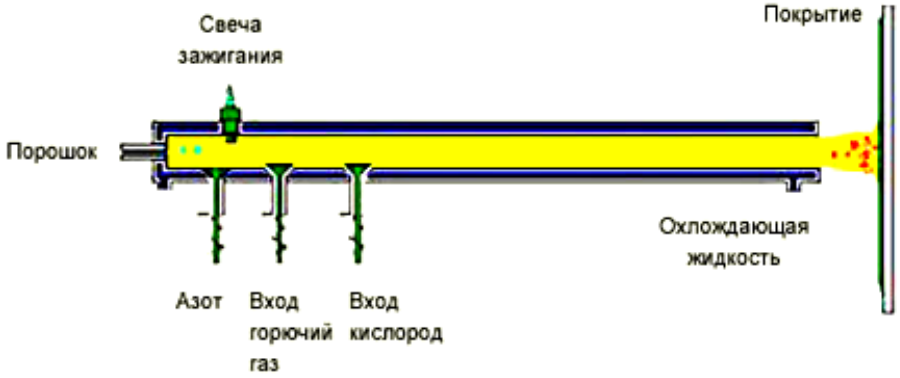


Рисунок 1.3 – Схема установки для детонационного напыления

Детонационно-газовые напыления благополучно применяются при упрочнении плоскостей автомобильных деталей находящихся под нагрузкой, которые могут производиться из большого ассортимента материалов. Покрытия выделяются значительными физико-механическими и эксплуатационными показателями. Однако, при детонационном напылении применяются смеси, которые явля-

ются взрывоопасными. Существенным минусом данного способа является огромная стоимость оборудования, а также большие значения шума при работе установки.

В настоящее время усиленно используется высокоскоростной газопламенный метод (HVOF) [35]. При напылении данным способом в качестве подзарядки используется ацетилен и пропилен, а для окисления – кислород. Энергия, которая вырабатывается в процессе сгорания, проходит для нагрева, а также ускорения порошка и газа. Наибольшая развиваемая скорость газа составляет 1400 м/с, а наибольшая развиваемая скорость частиц составляет от 400 до 500 м/с [35].

Принцип работы способа газопламенного напыления полагается на подогрев напыляемых порошковых материалов пламенем газов, а затем их транспортировании на дефектную поверхность посредством скоростного газового потока. Металл, которым производится напыление перемещается в область подогрева в виде порошка (рисунок 1.4), проволоки (прутка) (рисунок 1.5), а также в виде набивного шнура [35].

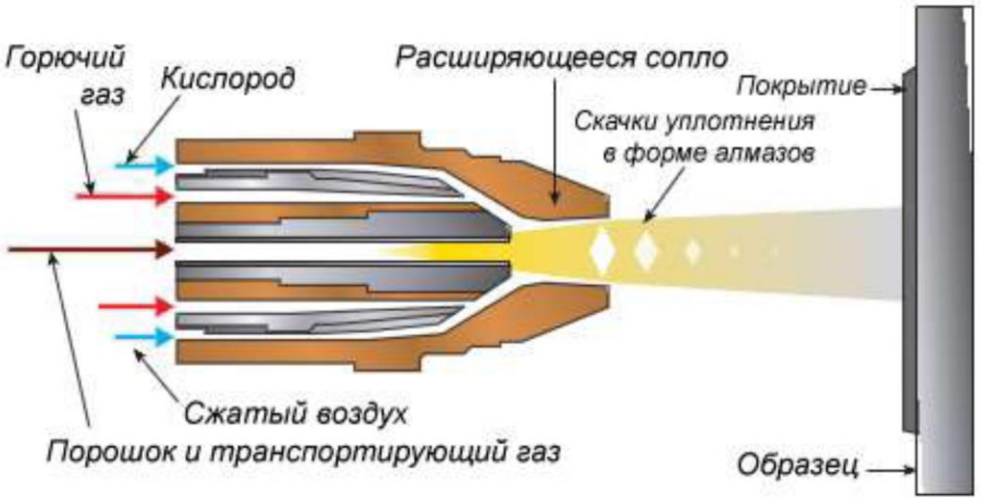


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема газопламенного напыления порошка

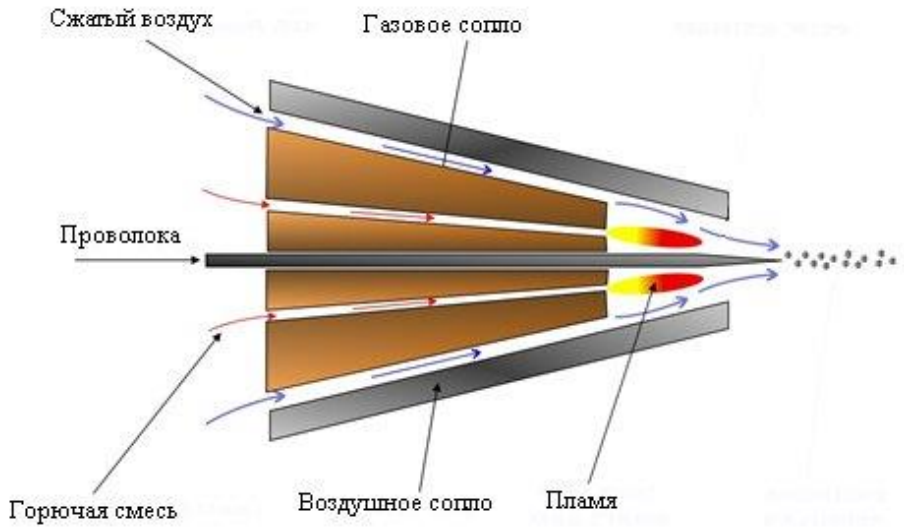


Рисунок 1.5 – Принципиальная схема газопламенного напыления проволокой

Перенос материала осуществляется сжатым воздухом либо компонентами, образующимися при сгорании углеводородного топлива, а тепло для того, чтобы обеспечить нагрев материала получают путем сжигания пропан-бутана или ацетилена в кислороде. Пульверизированные частички сплава, скоростные характеристики которых могут повышаться до 120 м/с, поступают на отработанную плоскость дефектной ГБЦ и создают покрытие. В этот момент скоростные показатели газового потока находятся в пределах от 150 до 160 м/с.

Оплавка покрытий выполняется газокислородным пламенем в индукторе либо похожим носителем тепловой энергии для поверхности покрытий, толщина которых находится в пределах от 0,5 до 1,8 мм. Газопламенное напыление применяется при восстановлении автомобильные деталей широкой номенклатуры – малогабаритные валы, оси, плоскости корпусных деталей, а также автомобильные детали, имеющие сложную форму и профиль.

Большие значения давление от 0,5 МПа до 1,0 МПа дают возможность развивать высокие значения скорости. При этом порошковые материалы в меньшей степени подвергаются окислению, потому что располагаются в потоке небольшой промежуток времени так как двигаются с очень высокой скоростью.

Способ является достаточно энергозатратным, так как более 30% энергии расходуется на водяное охлаждение баррели и сопла.

Значительное усовершенствование качественных показателей покрытий происходит при получении их с использованием высокоскоростных жидкотопливных аппаратов, они помогают добиться уменьшения количества окислов, улучшить показатели адгезионной стойкости, а также способствую уменьшению пористости покрытий [44-49]. Но данный способ имеет существенные ограничения, которые связаны с применением струи компонентов сгорания с значением температуры более 3000 К.

Наравне с явными достижениями в сфере газотермических способов формирования покрытий выделяется последовательность условий отрицательного характера, которые сопряжены с применением высокотемпературной струи [44-49]. Данный факт, существенно снижает сферу применения этого способа.

В момент перемещения порошкового материала в потоке с высокой температурной возможны существенные модификации его свойств, что не позволяет обеспечить требуемые характеристики покрытий. Также это затрудняет формирование композиционных покрытий из смеси порошковых материалов, которые имеют различные химические и физические свойства.

При формировании покрытий геотермическими способами нельзя использовать фракцию частиц меньше 10 мкм, так данные порошковые материалы будут полностью испаряться.

Из-за использования высокотемпературной струи происходит значительный нагрев напыляемого изделия, что будет негативно сказываться при восстановлении дефектных ГБЦ из алюминиевых сплавов так как может произойти коробление привалочной плоскости.

К указанным минусам классических способов нанесения порошковых покрытий необходимо отнести значительную цену оснащения, высокую сложность конструкции, незначительный интервал работы определенных компонентов, при этом процесс управления нанесением покрытий, является очень сложным.

1.3.1 Способ газодинамического напыления

Способ холодного газодинамического напыления был открыт в ИТПМ СО РАН в процессе постановки экспериментов по обтеканию объектов сверхзвуковым двухфазным потоком (твердые частицы + воздух) [90].

На рисунке 1.6 представлено сопоставление ключевых характеристик двухфазного потока, при которых осуществляется способ газодинамического напыления, с характеристиками, свойственными классическим способам напыления.

Способ газодинамического напыления оказывает, что присутствие высоких значений температуры в потоке не является основополагающим требованием, а следовательно покрытие может формироваться из порошковых частиц, которые обладают температурой на порядок меньше чем их температура плавления. Данный факт дает огромные перспективы для формирования новых технологических процессов и нового оборудования для напыления [71].

Исследования авторов [68] продемонстрировали ключевое значение размера скорости напыляемых частиц vp, определяющей ход образования покрытия, для основных материалов порошковых частиц, имеющих средний размер dp $\leq$ 50 мкм, имеются максимальные скорости их взаимосвязи с плоскостью (ucr1 = 500-600 м/с). Это говорит о том, что при взаимосвязи с плоскостью твердых порошковых частиц происходит процесс эрозии [72], в случае когда скорость порошковых частиц имеет значение меньше максимальной. Если частицы развивают скорость больше максимальной ход эрозии превращается в ход напыления, при этом от скорости порошковых частиц зависят и качественные показатели покрытий. Исходя из этого можно сделать предположение, что скорость порошковых частиц будет представляться ключевым параметрам при газодинамическом напылении.

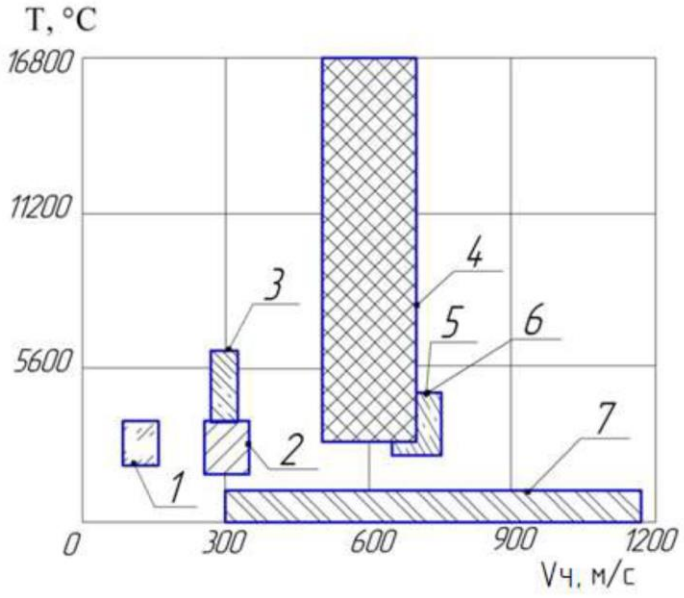


Рисунок 1.6 – Диаграмма используемых значений температуры Т и скорости частиц Vч для сравнения различных способов напыления.
1 – низкоскоростной газопламенный, 2 – высокоскоростной газопламенный, 3 – электродуговой, 4 — плазменный, 5, 6 – детонационный и высокоскоростной жидкотопливный, 7 – ХГН

Наращивание металлических покрытий газодинамическим напылением основано на явлении закрепления порошковых алюмосодержащих частиц, которые имеют высокие значения кинетической энергией, на поверхности мишени-плоскости в момент удара высокой скорости. В результате образуются высокопрочные покрытия различные по структуре, составу и свойствам в широком диапазоне толщин (от 0,01-10 мм). При нанесении оказывается незначительное тепловое воздействие, покрытия имеют малые остаточные напряжения, низкую пористость [68-73].

При напылении основным компонентом служит металлический ПМ, который оказывает наибольшее влияние на качество и стоимость восстановления дефектных деталей. Поэтому перед восстановлением дефектных деталей, в том числе из алюминиевых сплавов необходимо выбирать качественные материалы.

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.

Отличительной особенностью способа газодинамического напыления является то, что процесс наращивания покрытия происходит за счет придания металлических частицам значительных ускорений газовым потоком, который пропускается по сверхзвуковому соплу (рисунок 1.7).

Технологический процесс напыления порошковых материалов на плоскость дефектных автомобильных деталей, осуществляется на специализированном оборудованием «ДИМЕТ», которое производится в ОЦПН (Обнинский центр порошкового напыления).

При нанесении покрытий применяются порошковые частицы металлов и сплавов, а также применяются смеси с абразивными частицами. Регулирование параметров работы установки позволяет управлять пористостью и толщиной покрытий, а также производить либо абразивную очистку, либо наращивание газодинамического покрытия.

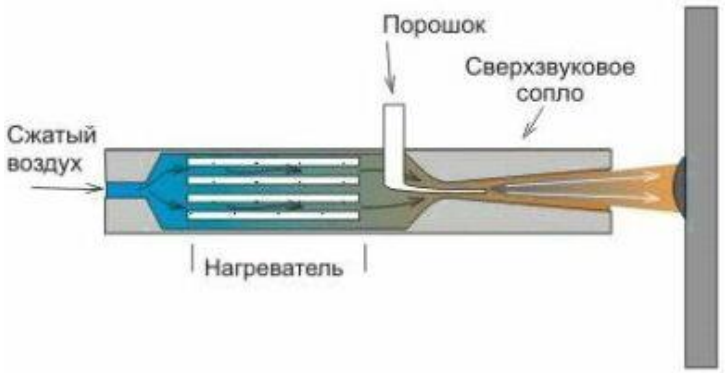


Рисунок 1.7 – Принципиальная схема газодинамического напыления

Способ холодного газодинамического напыления обладает рядом преимуществ относительно газотермических способов напыления, а именно:

– если на плоскости дефектной детали не имеется прочносцепленных загрязнений, то производить подготовку плоскости не требуется;

– газодинамическое напыление можно производить при всех значениях влажности воздуха и температуры;

– экологическая чистота технологического процесса;

– восстанавливаемая деталь не испытывает высоких влияний температуры;

– напыление можно производить без предварительного нагрева восстанавливаемой детали;

– имеется вероятность нанесения покрытий с чередованием слоев различного фазового состава;

– напыление можно производить на участки маленькой площади, так как ультразвуковое сопло имеет маленькое поперечное сечение;

Газодинамические покрытия обладают следующими свойствами:

– значительная когезия напыляемых частиц – от 30 МПа до 100 МПа;

– значительная адгезионная стойкость – от 30 МПа до 100 МПа;

– невысокие значения пористости покрытий – от 1 % до 3 %;

– газодинамические покрытия обладают высокой однородностью;

1.4 Материалы, используемые для газодинамического напыления

Порошковые материалы используемые при восстановлении автомобильных деталей способом газодинамического напыления характеризуются размерными характеристиками, которые могут составлять от 1 мкм до 100 мкм. В настоящее время производится много разновидностей порошковых материалов, определенные предприятия производят порошковые материалы, предназначенные только для газодинамического напыления. Все порошковые материала отличаются способом производ-

ства и характеристиками металлических частиц.

Обязательно нужно учитывать тот факт, что порошковые материалы изготовленные из одного и того же металла и имеющие одинаковые размерные характеристики, но сделанные на разных предприятиях, будут формировать отличающиеся по качественным показателям газодинамические покрытия. Исходя из этого следует, что перед напылением следует производить пробное напыление перед основным процессом восстановления.

Также очень важным показателем является влажность порошковых материалов, которая влияет на показатели сыпучести.

Если в период хранения емкости с порошковым материалом в нее попадает воздух, то необходимо провести сушку порошков. Сушка позволит улучшить показатели сыпучести. Обычно сушка производится при температуре в пределах от 120 до 150 °С в течении времени от 2 до 5 часов. Во время заполнения порошковым материалом питателя установки нужно следить за тем, чтобы не попадали в питатель инородные тела и грязь. Если напыление будет производится из комбинации нескольких марок порошковых материалов, то необходимо их предварительно смешать на специализированном оборудовании.

Для удаления оксидных пленок необходимо использовать механоактивацию, которая производится в мельницах и иных аналогичных устройствах.

Очень существенной деталью является подбор и контроль напыляемых материалов, так как в процессе наращивания напыляемого слоя происходит формирование покрытия за счет взаимосвязи друг с другом. Следовательно, от качества порошкового материала находится в зависимости когезия газодинамического покрытия.

Специализированные порошковые материалы для газодинамического напыления производятся предприятием «ДИМЕТ». Все порошковые материалы сертифицированы и выпускаются в упаковках объемом от 1кг. В таблице 1.2 показаны марки порошкового материала, которые производит предприятие «ДИМЕТ».

Таблица 1.2 – ПМ для газодинамического напыления

Марка	Назначение
А-20-11 (алюминий, цинк)	Герметизация отверстий и щелей в металлических радиаторах, конденсорах, теплообменниках и иных изделиях. Ремонт коррозионных и механических повреждений, сколов, пробоин, прогаров, заполнение трещин, промоин и других дефектов в алюминиевых, стальных и чугунных деталях
А-40-01 (алюминий)	Только для модели моделей Димет-403, Димет-404, Димет-405 с соплом СК-12. Восстановление формы алюминиевых деталей. Герметизация сквозных дефектов в металлических деталях
А-80-13 (алюминий, цинк)	Восстановление формы металлических деталей. Заполнение каверн, пор, трещин и других дефектов в изделиях из алюминия и его сплавов. Восстановление посадочных мест подшипников в алюминиевых, стальных и чугунных деталях
С-01-01 (медь)	Нанесение электропроводящих покрытий на алюминий, сталь, металлические сплавы, стекло, керамику. Покрытие поверхности алюминиевых, стальных, чугунных, керамических и стеклянных деталей для пайки оловом. На стекле и керамике требуется подслой алюминия А-10-01 или А-10-04
С-01-11 (медь, цинк)	Заполнение каверн, трещин и других дефектов в стальных, чугунных, бронзовых и латунных деталях. Ремонт деталей, работающих при температуре от 600 до 800°С. Восстановление посадочных мест подшипников в стальных и чугунных деталях
К-00-04-16 (оксид алюминия)	Очистка и струйно-абразивная подготовка поверхности стали и чугуна для нанесения металлических покрытий (повышенный износ сопловой вставки)

Продолжение таблицы 1.2

N3-00-02 (никель)	Только для моделей Димет-403, Димет-404, Димет-405. Электропроводящее покрытие для контактных площадок электрооборудования. Антикоррозионные и жаростойкие покрытия для защиты стальных деталей. На стекле и керамике требуется подслой алюминия А-10-01 или А-10-04.
N7-00-14 (никель, цинк)	Только для модели моделей Димет-403, Димет-404, Димет-405. Заполнение каверн, прогаров, трещин и других дефектов в изделиях, работающих при температуре от 900 до 1200°С.
Р1-00-01 (свинец)	Антикоррозионная защита в кислотных и щелочных средах. Герметизация пористости, микротрещин, резьбовых соединений
Т2-00-05 (олово)	Электропроводящее покрытие для контактных площадок электрооборудования
Никель N3-00-02	Электропроводящее покрытие для контактных площадок приборов и электрооборудования. Антикоррозионные и жаростойкие покрытия для защиты стальных деталей.
Сплав ПОС63ТР-63-25	Электропроводящее защитное покрытие для контактных площадок электрооборудования.
Z-00-11 (цинк)	Антикоррозионная защита локальных участков стальных деталей и элементов стальных конструкций (в том числе сварных швов)
БК2-100-60 (баббит БК-2)	Восстановление подшипников скольжения. Требуется блок СББ-03
Б83-100-40 (баббит Б-83)	Восстановление подшипников скольжения. Требуется блок СББ-03

1.5 Выводы к главе 1

Из обзора научной литературы, который бы проведен в первой главе можно сделать следующие выводы:

1. 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.

2. 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.

3. Процесс сварки деталей из алюминиевых сплавов протекает очень сложно из-за следующих факторов: недостаточная сплавляемость алюминиевого сплава из-за развития на его поверхности тугоплавкой оксидной оболочки $A1_2O_3$; если нагреть алюминиевый сплав до 400...450ºС , то он в значительной степени теряет свои прочностные характеристики; высокая температура плавления оксида алюминия (2050 °С) и низкая температура плавления алюминия (658 °С) затрудняет управление процессом сварки; и др.

4. Наравне с явными достижениями в сфере газотермических способов формирования покрытий выделяется последовательность условий отрицательного характера, которые сопряжены с применением высокотемпературной струи. Данный факт, существенно снижает сферу применения этого способа. В момент

перемещения порошкового материала в потоке с высокой температурной возможны существенные модификации его свойств, что не позволяет обеспечить требуемые характеристики покрытий. Также это затрудняет формирование композиционных покрытий из смеси порошковых материалов, которые имеют различные химические и физические свойства. При формировании покрытий геотермическими способами нельзя использовать фракцию частиц меньше 10 мкм, так данные порошковые материалы будут полностью испаряться. Из-за использования высокотемпературной струи происходит значительный нагрев напыляемого изделия, что будет негативно сказываться при восстановлении дефектных ГБЦ из алюминиевых сплавов так как может произойти коробление привалочной плоскости.

5. 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.

6. Рассмотрены основные марки порошковых материалов применяемых при восстановлении дефектных автомобильных деталей способом газодинамического напыления.

В связи с этим целью настоящей работы является совершенствование процесса газодинамического напыления дефектных головок блоков цилиндров путем применения электроэрозионных алюмосодержащих материалов, переработанных из 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.

ГЛАВА 2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕФЕКТНЫХ ГОЛОВОК БЛОКОВ ЦИЛИНДРОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

2.1 Физические основы способа газодинамического напыления дефектных головок блоков цилиндров

В процессе эксплуатации автомобильные детали утрачивают работоспособность под действием медленно нарастающего износа в результате действия высоких температур, механического изнашивания, коробления, пластической деформации, эрозионно-кавитационных явлений, коррозии и др.

Основным назначением напыляемых покрытий является обеспечение новых, более эффективных свойств автомобильных деталей. К таким свойствам относятся коррозионная стойкость, жаростойкость, повышенные электро- и теплопроводность, износостойкость, твердость и т.д., которые, в конечном счете, определяют надежность и долговечность восстановленных ГБЦ.

Цветные металлы – алюминий, медь, цинк, свинец, олово, и некоторые другие – применяют главным образом в качестве составных частей сплавов автомобильных деталей. Эти металлы значительно дороже черных и используются для выполнения особых требований: снижение массы, повышение антифрикционности, антикоррозионносги и др.

Газодинамическое напыление (ГДН) – перспективный способ восстановления автомобильных деталей из цветных сплавов. Основная особенность газодинамического напыления металлов – формирование покрытий осуществляется в условиях комнатных температур, поэтому устраняется вероятность образования окисления порошкового материала, а также плоскости дефектной детали, не появляются значительные внутренние напряжения на восстанавливаемых ГБЦ.

В диссертационной работе технологический процесс газодинамического напыления порошкового алюмосодержащего материала производился с помощью установки ДИМЕТ -404.

Сжатый воздух, подаваемый при давлении 0,5 МПа нагревается в температурном режиме №3, а затем направляется в сверхзвуковое сопло, в котором происходит формирование сверхзвукового потока. Затем в данный поток добавляются алюмосодержащие частицы ПМ (диаметр d = 20 мкм). Ускорение алюмосодержащих частиц происходит за счет газового потока, которые направляются на плоскость дефектной ГБЦ в нерасплавленном состоянии.

При контакте частиц с подложкой примерно 60% прилепляются к ней, а другая масса распространяется в окружающую среду.

Момент взаимосвязи алюмосодержащих частиц с плоскостью состоит из трех этапов.

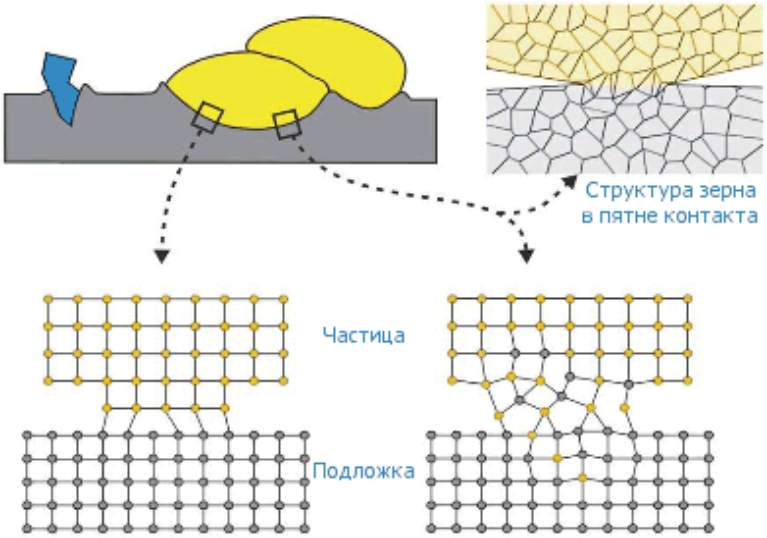
На первом этапе происходит очищение плоскости дефектной ГБЦ от масла, окислов, коррозии и других загрязнений за счет потока частиц вылетающих с большой скоростью. При этом происходит активация плоскости за счет оголения ювенильных участков.

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

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

Исследование момента образования газодинамического покрытия, а также его структуры установило, что в момент напыления закрепление ча-

стиц происходит по двум механизмам (рисунок 2.1).



а) б)

Рисунок 2.1 – Способ формирования металлических покрытий при ГДН: а) металлическая связь без плавления; б) микросварка на отдельных участках плавления

Очень близкое соприкосновение кристаллических решеток алюмосодержащих частиц ПМ и поверхности ГБЦ до момента формирования прочных связей, по крайней мере, в определенных зонах пятна контакта. Однако нигде на участке контакта не плавятся алюмосодержащие частицы либо плоскости ГБЦ.

В некоторых выступающих участках напыляемых алюмосодержащих частиц ПМ может возникать плавление части ПМ и формироваться точечная микросварка.

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 про-

никновении частиц.

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

Классическая механика контактных взаимодействий связана, прежде всего, с именем Генриха Герца, который решил задачу о контакте двух упругих тел с искривлёнными поверхностями. Этот классический результат и сегодня лежит в основе механики контактного взаимодействия. Лишь столетие спустя Джонсон, Кендал и Робертс нашли аналогичное решение для адгезионного контакта.

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.

Несогласованными будем называть тела, имеющие различные по форме профили. Если такие тела привести в контакт без деформации, то они сначала соприкасаются в точке или вдоль линии.

Пусть тела несогласованной формы, приведенные в контакт пренебрежимо малой силой, соприкасаются в точке. Примем эту точку О за начало прямоугольной системы координат Oxyz.. Контактирующие тела, показанные на рисунке 2.2, отметим цифрами 1 (нижнее) и 2 (верхнее). Ось Oz выберем таким образом, чтобы она совпадала с общей нормалью к поверхностям обоих тел в точке О. Таким образом, плоскость xy является касательной к обеим поверхностям и называется соприкасающейся плоскостью. Направления осей Ox и Oy выберем так, чтобы они совпадали с осями симметрии профилей поверхности [71].
Недеформированные поверхности обоих тел в рамках описанной системы отсчета зададим функциями $Z_1 = f_1(x, y)$, $Z_2 = f_2(x, y)$.

Зазор между поверхностями перед нагружением будет определяться выражением $h = Z_1 + Z_2 = f(x, y)$.

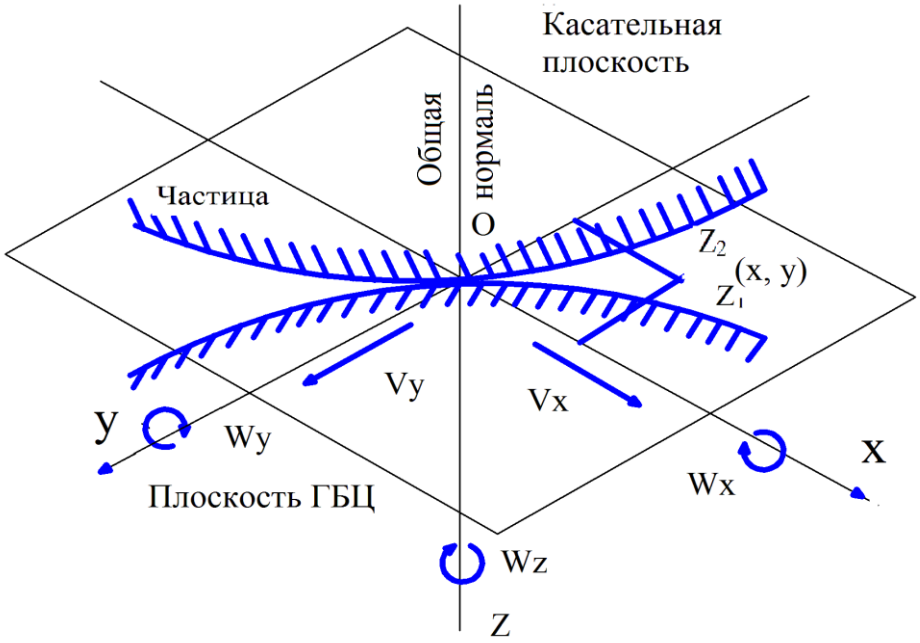


Рисунок 2.2 – Контакт несогласованных поверхностей в точке О

Профили контактирующих тел вблизи начала координат можно представить в следующем виде:

$$Z_1 = \frac{x_1^2}{2R_1'} + \frac{y_1^2}{2R_1''} \tag{2.1}$$

$$Z_2 = \frac{x_2^2}{2R_2'} + \frac{y_2^2}{2R_2''} \tag{2.2}$$

где – R' и R" главные радиусы кривизны поверхности в начале координат. Они имеют максимальное и минимальное значение среди радиусов кривизны всех сечений профиля в этой точке.

В этих выражениях координатные оси для каждого тела ориентированы по направлениям главных кривизн. В общем случае соответственные координатные оси могут быть наклонены друг относительно друга на некоторый произвольный угол θ, как показано на рисунке 2.3 а.

Выполним переход к новой единой системе осей (x, y), где ось x наклонена под углом α к оси x_1 и под углом β к оси x_2.

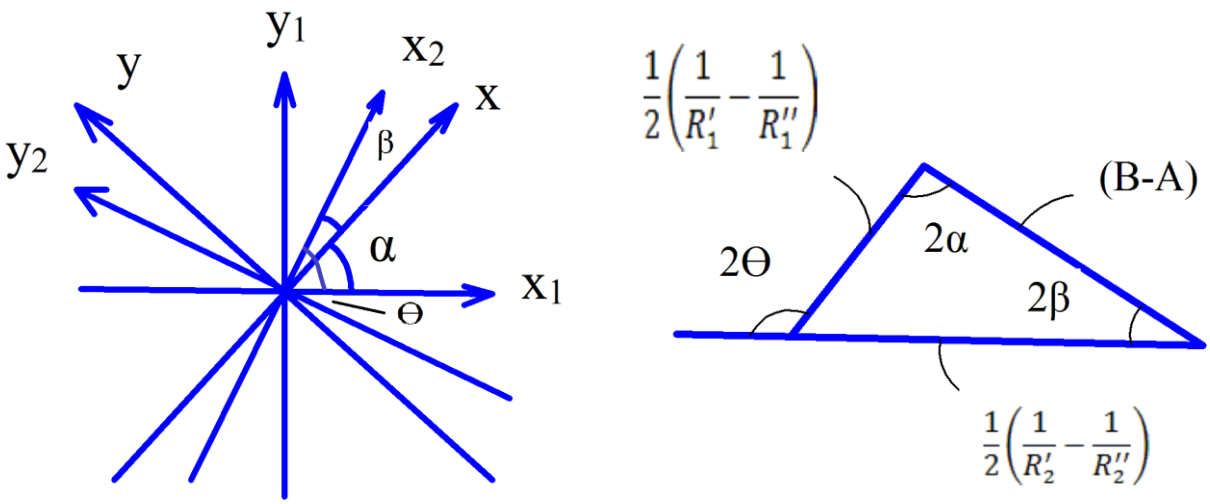
Расстояние между соответствующими точками обеих поверхностей можно

записать в виде:

$$h = z_1 - z_2 = Ax^2 + By^2 + Cxy \tag{2.3}$$

где α Θ

$$C = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_2'} - \frac{1}{R_2''}\right)\sin 2\beta - \frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_1'} - \frac{1}{R_1''}\right)\sin 2\alpha \tag{2.4}$$



а) б)

Рисунок 2.3 – Геометрия контактирующих несогласованных поверхностей: а – поворот плоскостей; б – расчет расстояния между поверхностями

Из треугольника, показанного на рисунке 2.2 б, видно, что условие равенства константы С равно нулю, при котором расстояние между поверхностями равно

$$h = Ax^2 + By^2 \tag{2.5}$$

где А и В – положительные постоянные.

равносильно выполнению следующего соотношения:

$$A - B = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_1'} - \frac{1}{R_1''}\right)\cos 2\alpha + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_2'} - \frac{1}{R_2''}\right)\cos 2\beta \tag{2.6}$$

$$|A - B| = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{1}{R_1'} - \frac{1}{R_1''}\right)^2 + \left(\frac{1}{R_2'} - \frac{1}{R_2''}\right)^2 + 2\left(\frac{1}{R_1'} - \frac{1}{R_1''}\right)\left(\frac{1}{R_2'} - \frac{1}{R_2''}\right)\cos 2\theta\right]^{1/2} \tag{2.7}$$

Тогда

$$A + B = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_1'} + \frac{1}{R_1''} + \frac{1}{R_2'} + \frac{1}{R_2''}\right) \quad (2.8)$$

Откуда находим $A=1/(2R')$ и $B=1/(2R'')$. Заметим, что кривизна вогнутой поверхности считается отрицательной.

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

Находим полную нагрузку P:

$$P=2/3p_0\pi ab \quad (2.9)$$

откуда среднее контактное давление, действующее на каждое тело:

$$p_m=2/3\ p_0 \quad (2.10)$$

где p_0 – максимальное контактное давление

Распределение давления определяется выражением:

$$p= p_0(1-x^2/a^2- y^2/b^2)^{1/2} \quad (2.11)$$

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

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \quad (2.12)$$

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

с учетом

$$a/b\approx(R' / R'')^{2/3} \quad (2.13)$$

Вводя обозначение $c = (ab)^{1/2}$, подставляя p_0 из (2.9) и учитывая смещение, т.е. форму поверхности тел вне области соприкосновения [71], получим:

$$c = (ab)^{1/2} = \left(\frac{3PR_e}{4E^*}\right)^{1/3} \cdot F_1(R'/R'') \qquad (2.14)$$

Максимальное контактное давление

$$p_0 = \frac{3P}{2\pi ab} = \left(\frac{6PE^{*2}}{\pi^3 R_e^2}\right)^{1/3} \cdot [F_1(R'/R'')]^{-2/3} \qquad (2.15)$$

Сближение удаленных точек

$$\delta = \left(\frac{9P^2}{16R_e E^{*2}}\right)^{1/3} \cdot F_2(R'/R'') \qquad (2.16)$$

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.

Из выражения (2.5) следует, что линии постоянного зазора h между недеформированными поверхностями представляют собой эллипсы, отношение полуосей которых равно $(B/A)^{1/2} \approx (R'/R'')^{1/2}$.

Из отношений (2.6), (2.7), полагая $R_1' = R_2' = R$, где R- относительный радиус кривизны, применительно к нашему случаю – радиус напыляемой частицы, $R_1'' = R_2'' = \infty$, $\alpha = 45°$, получим:

$$A + B = \frac{1}{R},\ A - B = \frac{1}{\sqrt{2}R},\ \text{откуда}\ A = \frac{1-\frac{1}{\sqrt{2}}}{2R},\ B = \frac{1+\frac{1}{\sqrt{2}}}{2R}$$

Относительные радиусы кривизны: $R' = \frac{1}{2A} \approx 3{,}42R$, $R'' = \frac{1}{2B} \approx 0{,}585R$

Поскольку эквивалентный радиус $R_e = (R' \cdot R'')^{1/2} = \sqrt{2}R$

$$(R' \cdot R'')^{1/2} = (B/A)^{1/2} \approx 2{,}41$$

В нагруженном состоянии согласно уравнения (2.12) $\frac{a}{b} = 3{,}25$

Введем в (2.15) и (2.16) коэффициент, , учитывающий размер напыляемых частиц – $K = 1/R_e = 1/(\sqrt{2}R)$, получим:

$$p_0 = \left(\frac{6PE^{*2}K^2}{\pi^3}\right)^{1/3} \quad (2.17)$$

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

Поскольку эквивалентный радиус R_e определяется в мкм, то размерность коэффициента К $(мкм)^{-1}$.

$$\delta = \left(\frac{9P^2K}{16E^{*2}}\right)^{1/3} \quad (2.18)$$

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 (2.17) с увеличение размера напыляемых частиц контактное давление уменьшается.

Давление создаваемое в пятне контакта имеет возможность превышать предел текучести алюмосодержащих частиц и плоскости. Для алюминия предел текучести является равным 5 ГПа, это значение ниже давления, производимого частицей на поверхность ГБЦ (8,7 ГПа). Как показывают исследования других авторов [73] деформация частиц и подложки при газодинамическом напылении зачастую является пластической, данный эффект приводит к значительной диссипации первоначальной энергии алюмосодержащих частиц, а затем к высвобождению данной энергии в виде тепла. Исходя из выведенной формулы (2.17), можно сделать предположение, что уменьшение размера напыляемых частиц, будет способствовать увеличению контактного давления, а следовательно способствовать улучшению адгезионной прочности и коррозионной стойкости газодинамических покрытий.

2.2 Выводы к главе 2

1. При газодинамическом напылении алюмосодержащих частиц диаметром d = 20 мкм на основу из алюминиевого сплава (μ = 0,38; $E_1 = E_2$= 65 ГПа; ρ= 2,7 г/см^3) было рассчитано максимальное давление частиц ПМ на плоскость ГБЦ, которое составило P_{max}= 8,7 ГПа. Как показывают исследования других авторов [73] деформация частиц и подложки при газодинамическом напылении зачастую является пластической, данный эффект приводит к значительной диссипации первоначальной энергии алюмосодержащих частиц, а затем к высвобождению данной энергии в виде тепла. Исходя из этого, можно сделать предположение, что для повышения адгезионной прочности и коррозионной стойкости покрытий, необходимо уменьшить фракцию порошкового материала, по отношению к выпускаемому промышленностью марки А-20-11. Предположительно для этих целей можно будет использовать порошковый материал, полученный способом электроэрозионного диспергирования, который будет решать актуальную задачу – переработку промышленных отходов.

ГЛАВА 3

МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предмет исследования диссертационной работы является технология восстановления дефектных ГБЦ двигателей автомобилей газодинамическим напылением с применением алюмосодержащими электроэрозионных материалов.

Если брать во внимание объем производства и области использования, то можно сказать, что алюминий находится на первом месте по распространенности среди цветных металлов, из-за большого количества положительных характеристик, а именно:

– алюминий имеет не высокую температуру плавления – 658°С;

– алюминий обладает низкими показаниями плотности;

– значительные показатели теплопроводности и электропроводности;

– легко подвергается механической обработке;

– обладает достаточно большой коррозионной стойкостью в воздушной и других средах.

Имеющиеся в данный момент способы получения порошковых материалов имеют ряд недостатков, таких как: взрывоопасность, крупнотоннажность, высокие энергетическиезатраты, оборудование занимает огромные, экологические проблемы и т.д.

3.1 Методика получения электроэрозионного порошкового материала из отходов алюминия

Обзор способов получения алюмосодержащего порошкового материала показал, что известные марки алюмосодержащими порошкового материала различных форм и размеров получают разнообразными способами:

– путем распыления расплава металла сжатым газом с последующей классификацией продукта распыления, патент РФ №2026157, 6 МПК B22F 9/08;

– путем электрического взрыва алюминиевой проволоки в газовой атмосфере азота, патент РФ №2112629, 6 МПК B22F 9/14;

– посредством механического сухого размола алюминиевой заготовки в атмосфере инертного газа в присутствии жировых добавок, в качестве которых используют продукты, получаемые при переработке нефти, патент РФ №2108534, 6 МПК F42B 4/00, F42B 4/30;

– путем распыления расплава нагретым до 300-400°С инертным газом, с температурой расплава – 880°С, дальнейшего охлаждения инертным газом, патент РФ №2081733, 6 МПК B22F 9/08, C22C 1/14;

– путем получения гидрореагирующей смеси, включающей порошок алюминия и порошок магния, легированный никелем, патент РФ №2131841, 6 МПК C01B 3/08, C01B 6/24.

У представленных выше способов получения порошковых материалов имеются следующие минусы:

– ограниченная применимость;

– отсутствие возможности управления характеристиками получаемых порошковых материалов.

– высокие энергетические затраты;

– экологические проблемы.

Одним из перспективных способов получения порошковых материалов, практически из любого токопроводящего материала, в том числе и отходов алюминия, является способ электроэрозионного диспергирования (ЭЭД), отличающийся относительно невысокими энергетическими затратами и экологической чистотой процесса [73-115].

Основными преимуществами способа ЭЭД является:

– экологическая чистота процесса;

– компактность технологического оборудования (8-10 $м^2$ на одну установку);

– низкая удельная энергоемкость процесса (1,5-3 кВт для производства 1 кг ПМ);

– возможность получения особо чистых ультра – и нанодисперсных металлических ПМ;

– возможность протекание высокотемпературных процессов под воздействием плазмы искровых разрядов при температуре рабочей среды, близкой к комнатной;

– возможность получения ПМ сферической формы;

– возможность (в случае изменения свойств рабочей среды) осуществления в процессе диспергирования химических реакций и получение порошковых оксидов, гидроксидов, нитридов, карбидов, шпинелей и т.д.

Поэтому для получения материала (алюмосодержащего ПМ), используемого при восстановлении рабочих характеристик дефектных головок блоков цилиндров был выбран способ электроэрозионного диспергирования (ЭЭД). Для проведения экспериментов применялась установка для получения нанодисперсных ПМ из материалов, проводящих ток (патент РФ № 2449859), которая состоит из регулятора напряжения, генератора импульсов и реактора (рисунок 3.1) [80-89].

Получаемые этим способом порошковые материалы, имеют в основном сферическую и эллиптическую форму частиц. Причем, изменяя электрические параметры процесса диспергирования (напряжение на электродах, емкость конденсаторов и частоту следования импульсов) можно управлять шириной и смещением интервала размера частиц, а также производительностью процесса.

Для получения алюмосодержащего ПМ способом электроэрозионного диспергирования использовали алюминиевую проволоку ГОСТ 14838-78, предварительно нарезанную по 5-7 см. На первом этапе производили сортировку алюминиевых отходов, их промывку, сушку, обезжиривание и взвешивание. Реактор заполняли рабочей средой – дистиллированной водой, отходы загружали в реактор.

Монтировали электроды. Реактор представляет собой емкость, заполненную рабочей жидкостью. В качестве емкости реактора использовался эксикатор 2–240 ГОСТ 25336–82. К генератору импульсов подключали регулятор напряжения и смонтированные электроды, затем устанавливали необходимые параметры процесса: частоту следования импульсов, напряжение на электродах, емкость конденсаторов.

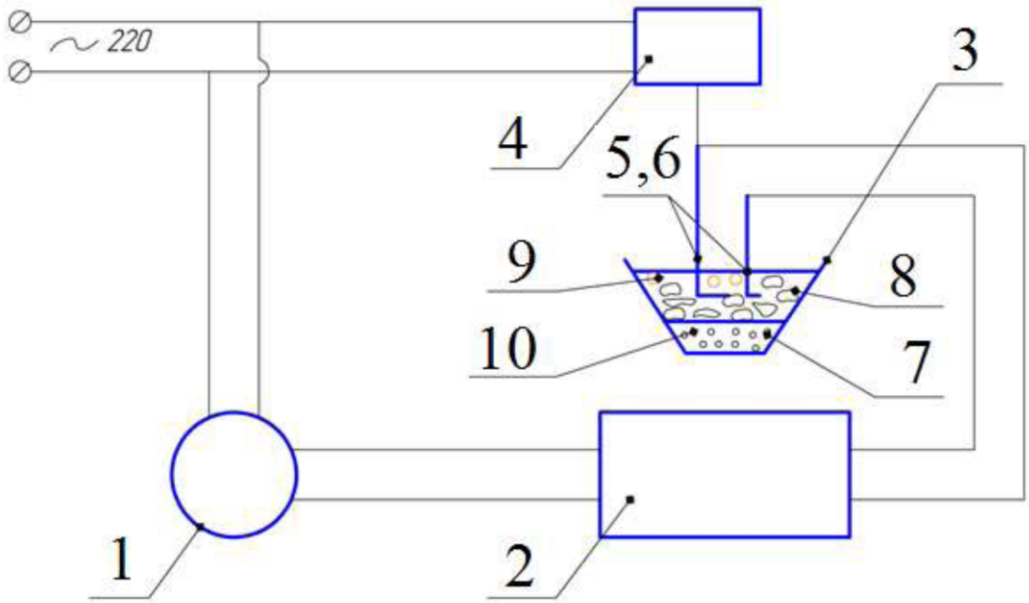


Рисунок 3.1 – Схема установки электроэрозионного диспергирования
1 – регулятор напряжения; 2 – генератор импульсов;
3 – реактор; 4 – встряхиватель; 5,6 – электроды; 7 – частицы алюмосодержащего ПМ; 8 – алюминиевые отходы; 9 – газовый пузырь;10 – рабочая жидкость.

С помощью генератор импульсов можно выполнять преобразование переменного тока промышленной частоты и формировать импульсы заданной амплитуды, длительности и частоты следования. Требования, предъявляемые к ГИ: высокий КПД, сохранять в процессе ЭЭД установленный режим диспергирования, т.е. стабильность в работе.

Регулятор напряжения регулирует и устанавливает нужное переменное напряжение перед генератором импульсов. В данной установке применен однофазный регулятор напряжения РНО–260–10 ТУ 16.-817.298–70, который позволяет регулировать выходное напряжение 0 … 260 В, а силу тока до 45А и максимальную мощность 12 кВт.

На втором этапе – этапе электроэрозионного диспергирования включали установку. Процесс ЭЭД представлен на рисунке 3.1. Импульсное напряжение генератора 2 прикладывается к электродам 5 и далее к алюминиевым отходам 8 (в качестве электродов также служат алюминиевые отходы). При достижении напряжения определённой величины происходит электрический пробой рабочей среды 10, находящийся в межэлектродном пространстве, с образованием канала разряда. Благодаря высокой концентрации тепловой энергии, материал в точке разряда плавится и испаряется, рабочая среда испаряется и окружает канал разряда газообразными продуктами распада (газовым пузырём 9). В результате развивающихся в канале разряда и газовом пузыре значительных динамических сил, капли расплавленного материала выбрасываются за пределы зоны разряда в рабочую среду, окружающую электроды, и застывают в ней, образуя каплеобразные частицы алюмосодержащего порошкового материала 7.

На третьем этапе проводится выгрузка рабочей жидкости с порошком из реактора.

На четвертом этапе происходит выпаривание раствора, его сушка, взвешивание, фасовка, упаковка и последующий анализ порошка. Этапы получения алюмосодержащего порошкового материала способом электроэрозионного диспергирования отходов алюминия представлены на рисунке 3.2.

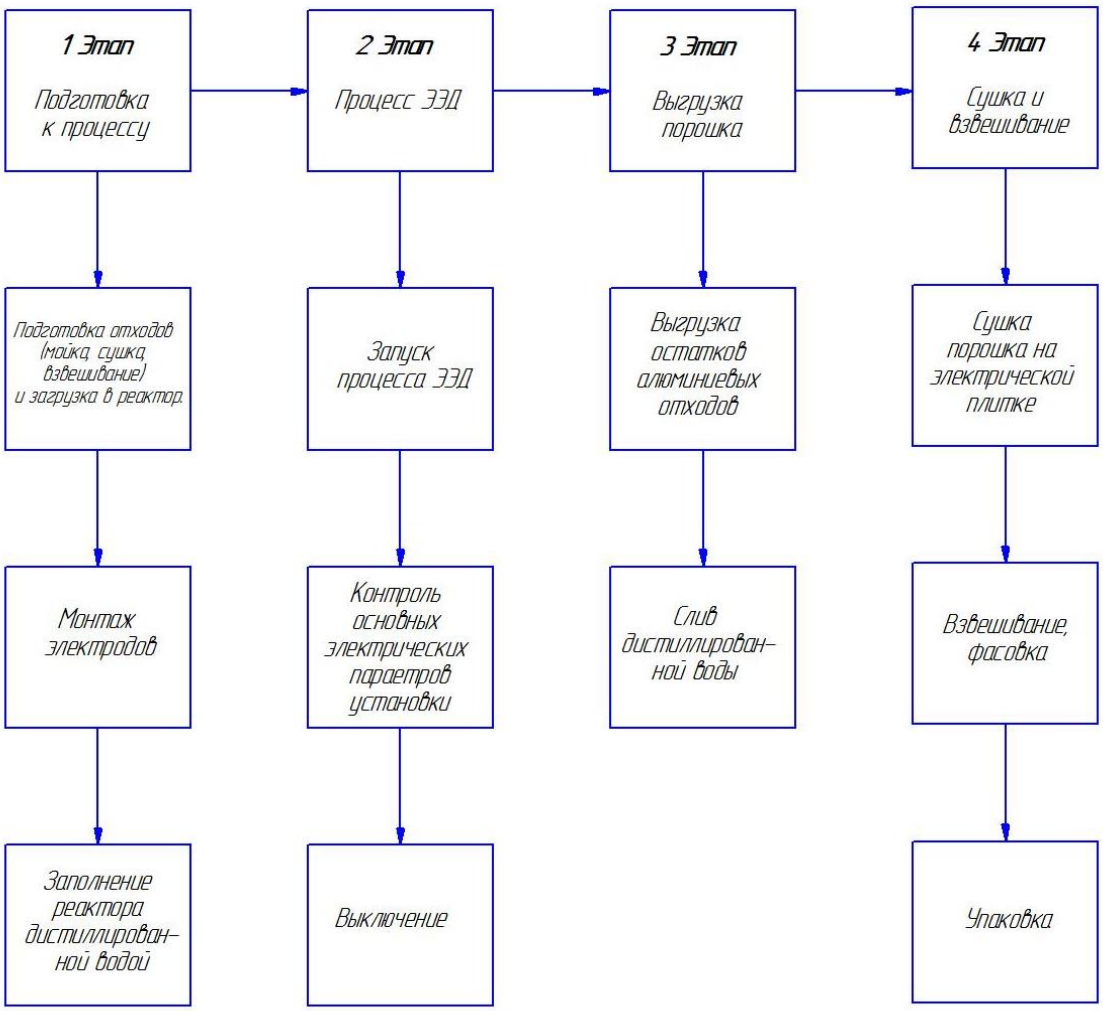


Рисунок 3.2 – Этапы получения алюмосодержащего ПМ

Алюмосодержащий порошковый материал получали при двух разных режимах установки в первом случае процесс проводили при следующих электрических параметрах: емкость разрядных конденсаторов 65 мкФ; напряжение 90 В; частота импульсов 50 Гц. При таких параметрах получается оксид алюминия (корунд) (Рисунок 3.3 а), который используется для абразивной очистки поверхности головки блока цилиндра. Во втором случае процесс проводили при следующих электрических параметрах: емкость разрядных конденсаторов 65 мкФ; напряжение 100 В; частота импульсов 140 Гц. При таких параметрах получался ПМ (ри-

сунок 3.3 б), который в дальнейшем использовался для напыления на поверхность дефектной головки блока цилиндров.

При этом достигается следующий технический результат: получение алюмосодержащего ПМ (рисунок 3.3а, б) с частицами правильной сферической формы с невысокими энергетическими затратами и экологической чистотой процесса способом электроэрозионного диспергирования (ЭЭД).

а) б)

Рисунок 3.3 – Алюмосодержащий ПМ, полученный способом ЭЭД:
а) ПМ для абразивной очистки; б) ПМ для напыления

Способ электроэрозионного диспергирования основывается на выплавлении частиц металла с поверхности импульсом электрического разряда. Если задано напряжение (расстояние) между электродами, погруженными в жидкий диэлектрик, то при их сближении (увеличении напряжения) происходит пробой диэлектрика – возникает электрический разряд, при этом образуется плазма с высокой температурой.

Так как время используемое в данном способе обработки электрических импульсов, не превышает 0,01с, то выделяющееся тепло не успевает распространиться вглубь материала (алюминиевых отходов) и даже незначительной энергии оказывается достаточно, чтобы разогреть, расплавить и испарить небольшое количество металла.

Массовое использование способа ЭЭД с целью переработки алюминиевых отходов в порошковый материал для повторного использования, сдерживается из-за отсутствия в научно-технической литературе полноценных сведений о влиянии исходной структуры (состава), режимов и среды получения на свойства порошков и практического применения технологий. В результате этого разработка технологий по переработке (повторного использования) алюмосодержащих порошковых материалов, которые получены из отходов алюминия, и исследования эффективности их использования, необходимо проведение целого комплекса теоретических и экспериментальных исследований.

3.2 Методика исследования гранулометрического состава электроэрозионного порошкового материала из алюминия

Полученные способом ЭЭД ПМ в зависимости от параметров получения (в основном от энергии импульса) имеют довольно широкий диапазон распределения частиц ПМ по размерам – от нескольких нанометров до сотен микрон. И изменяя энергию импульса, можно получать ПМ с различным средним размером частиц. Но даже ПМ, полученный на одном режиме, также имеет широкий диапазон изменения частиц по размерам вследствие реализации одновременно трех механизмов образования частиц (хрупкое разрушение, кристаллизация паровой и жидкой фазы).

Исследование гранулометрического состава ПМ, полученного способом электроэрозионного диспергирования из алюминиевых отходов, проводили на лазерном анализаторе размеров частиц Analysette 22 NanoTec, который имеет следующие особенности:

–измерение наночастиц в исключительно широком диапазоне измерения 0,01 – 2100 мкм;

– быстрый, автоматический анализ размера частиц;

– простое измерение с малым временем измерения;

– особенно высокая точность измерения за счет анализа 110 каналов;

– достоверная воспроизводимость – надежная сопоставимость;

– удобное для пользователя управление;

– быстрый переход между измерением в жидкой и сухой средах;

– быстрая и простая очистка;

– обширный ассортимент принадлежностей для облегчения Вашей повседневной работы.

Analysette 22 NanoTec является идеальным лазерным прибором для измерения размера частиц для определения распределения размеров частиц в порошкообразных пробах, твердых веществах в суспензиях и эмульсиях. Таким образом, прибор отлично подходит для применения в контроле качества и технологического процесса, также как и в исследованиях и разработках.

Очень широкий диапазон измерения прибора Analysette 22 NanoTec образуется благодаря комбинации двух лазеров с двумя различными расстояниями между измерительной ячейкой и детектором: Крупные частицы регистрируются инфракрасным лазером при большом расстоянии между измерительными ячейками, а для малых частиц используется зеленый лазер при малом расстоянии между измерительными ячейками. Это позволяет регистрировать рассеянный свет в направлении вперед с углом рассеяния до 65°. Измерение частиц малого размера вплоть до нанодиапазона осуществляется с помощью зеленого лазера в обратном рассеянии. Это обеспечивают расположенные специальным образом детекторы. Результат: идеальные измерения с особой достоверностью, убедительная сопоставимость и надежная воспроизводимость.

В Analysette 22 NanoTec общий диапазон измерения от 0,01 – 2100 мкм можно регистрировать без перенастройки оптических элементов. При этом изменяется расстояние между детектором и измерительной ячейкой путем автоматического перемещения. В измерительной ячейке находятся подготовленные с помощью используемого блока диспергирования частицы пробы, помещенные на путь лазерного луча.

Путем изменения расстояния между детектором и измерительной ячейкой каждый раз регистрируется новый угловой диапазон рассеянного света. На основании этих данных рассчитывается распределение частиц по размерам.

Определение распределения по размерам частиц порошков проводили методами диспергирования в жидкости с ультразвуком.

При диспергировании в жидкости с ультразвуком использовалась следующая методика исследований:

– выбор максимального диапазона измерения в пределах 0,01–1021,87 мкм, так как изначально неизвестен размер частиц алюмосодержащего порошкового материала;

– автоматическое юстирование лазерного луча;

– чистка системы в автоматическом режиме;

– выбор оператором параметров измерений: проведение измерений продолжительностью 50 сканов – среднее значение; мешалка: 70 %; абсорбция луча: 5 %.

– измерение фона. Проводится с целью снижения влияния измерительной жидкости;

– исследование распределения алюмосодержащих частиц порошкового материала по размеру: исследуемый образец объем которого составляет 5 мл наливали в модуль для диспергирования в жидкости (объем 500 мл). Модуль для диспергирования в жидкости обеспечивает автоматическую промывку. Исследование данного типа порошкового материала исследуют с использованием генератора ультразвукового типа. Измерение начинается автоматически, как только значение абсорбции достигнет указанной величины;

– в результате экспериментальных исследований получили кривые распределения частиц ПМ по размеру: дифференциальные, кумулятивные и др., а также форму частицы ПМ (коэффициент элонгации: минимальный, средний, максимальный).

3.3 Методика исследования формы и морфологии частиц электроэрозионного порошкового материала из алюминия

В зависимости от химической природы металла и способа получения частицы ПМ могут иметь различную форму – сферическую, каплеобразную и отчасти сферическую, губчатую тарельчатую, дендритную, осколочную, волокнистую и лепестковидную.

Форма частиц ПМ и состояние их поверхности оказывает большое влияние на насыпную плотность и прессуемость, а также на плотность, прочность и однородность прессовок. Наименьшую насыпную плотность и наибольшую прочность имеют прессовки из ПМ с дендритной формой частиц. Наоборот, ПМ с частицами сферической формы имеют максимальную насыпную плотность, но плохо прессуются. Для получения из них прессовок с достаточной прочностью требуются большие давления. ПМ с чешуйчатой формой очень плохо прессуются, а полученные из них прессовки склонны к растрескиванию и расслоению. Волокнистые ПМ плохо прессуются и применяются в основном в качестве армирующих (упрочняющих) добавок при создании волокнистых материалов.

С целью изучения формы и морфологии частиц ПМ, полученных способом ЭЭД из алюминиевых отходов, были сделаны снимки на растровом (сканирующем) электронном микроскопе QUANTA 600 FEG.

Микроскоп позволяет получать изображения различных объектов с увеличением, превышающим 100 000 крат. Он предназначен для выполнения различных исследований с минимальными затратами времени на препарирование объектов, обеспечивая их наблюдение с исключительной глубиной резкости. Quanta 600 FEG позволяют работать с разнообразными типами образцов (в том числе непроводящими, загрязненными, влажными образцами и образцами, способными к газовыделению при вакуумировании).

QUANTA 600 FEG с полевой эмиссией электронов (производитель FEI

(Голландия)) – электронно-ионный сканирующий микроскоп с электронно-лучевой колонной, оснащенной вольфрамовым катодом имеет следующие характеристики представленные в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Технические характеристики QUANTA 600 FEG

Параметр	Описание
Ускоряющее напряжение	от 200 эВ до 30 кВ
Разрешение	При оптимальном WD – 3,5 нм при 35 кВ; 3,5 нм – при 30 кВ в режиме естественной среды; < 15 нм– при 1 кВ в режиме низкого вакуума;
Ионная колонна Magnum	с галлиевым жидкометаллическим источником ионов
Ускоряющее напряжение	От 5 кВ до 30 кВ, разрешение – 20 нм
Оснащение системы	Осевым моторизованным столиком 50×50×25 мм, газовыми инжекционными системами для напыления проводников и диэлектриков, а также для травления образцов.

При помощи растровой электронной микроскопии имеется возможность непосредственного анализа частиц порошка с достаточно высоким разрешением. В растровом электронном микроскопе достигается большая глубина фокуса, что позволяет наблюдать объёмное изображение изучаемой структуры.

3.4 Методика проведения рентгеноспектрального микроанализа частиц электроэрозионного порошкового материала из алюминия

Рентгеноспектральный анализ частиц алюмосодержащего ПМ выполнен с помощью энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы EDAX, встроенного в растровый электронный микроскоп QUANTA 600 FEG.

Под рентгеноспектральным микроанализом понимают определение элементного состава микрообъектов по возбуждаемому в них характеристическому рентгеновскому излучению. Для анализа характеристического спектра в рентгеноспектральном микроанализе используют два типа спектрометров (бескристаллический либо с кристаллом-анализатором), базой для РСМА служит электронно-оптическая система растрового электронного микроскопа.

При взаимодействии электронного зонда с образцом (рисунок 3.4) одним из возбуждаемых сигналов является рентгеновское излучение, которое можно разделить на характеристическое и тормозное.

Тормозное рентгеновское излучение возникает вследствие торможения первичных электронов в электрическом (кулоновском) поле атомов анализируемого материала. Кинетическая энергия первичных электронов в этом случае частично или полностью преобразуется в энергию рентгеновского излучения. Соответственно излучение имеет непрерывный спектр с энергией от нуля до энергии падающего электрона, и поэтому его еще называют непрерывным рентгеновским излучением. При рентгеноспектральном микроанализе тормозное излучение нежелательно, так как вносит основной вклад в увеличение уровня фона и не может быть исключено.

При проникновении первичных электронов в образец они тормозятся не только электрическим полем атомов, но и непосредственным столкновением с электронами атомов материала. В результате этого первичные электроны могут выбивать электроны с внутренних K-, L- или M-оболочек, оставляя атом образца

в энергетически возбужденном состоянии. Образующиеся вакансии заполняются переходами электронов с более высоких энергетических уровней. Атом переходит в основное состояние, избыточная энергия выделяется в виде кванта рентгеновского излучения.

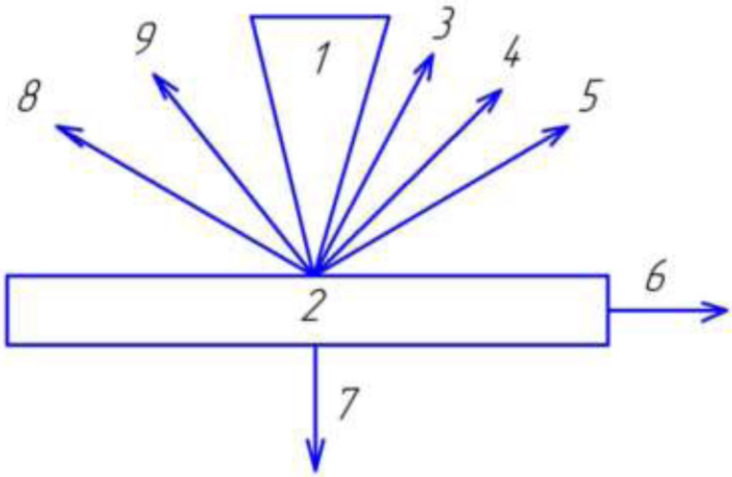


Рисунок 3.4 – Эффекты взаимодействия электронного луча с объектом
1 – электронный луч; 2 – объект; 3 – отраженные электроны; 4 – вторичные электроны; 5 – Оже-электроны; 6 – ток поглощенных электронов;
7 – прошедшие электроны; 8 – катодно-люминесцентное излучение;
9 – рентгеновское излучение.

Поскольку энергия возникающего кванта зависит только от энергии участвующих в процессе электронных уровней, а они являются характерными для каждого элемента, возникает характеристическое рентгеновское излучение. Так каждый атом имеет вполне определенное конечное число уровней, между которыми возможны переходы только определенного типа, характеристическое рентгеновское излучение дает дискретный линейчатый спектр.

Важной характеристикой РСМА является его локальность, т.е. объем вещества, в котором возбуждается характеристическое рентгеновское излучение. Он

определяется в первую очередь диаметром электронного зонда на образце и зависит от ускоряющего напряжения и химического состава материала.

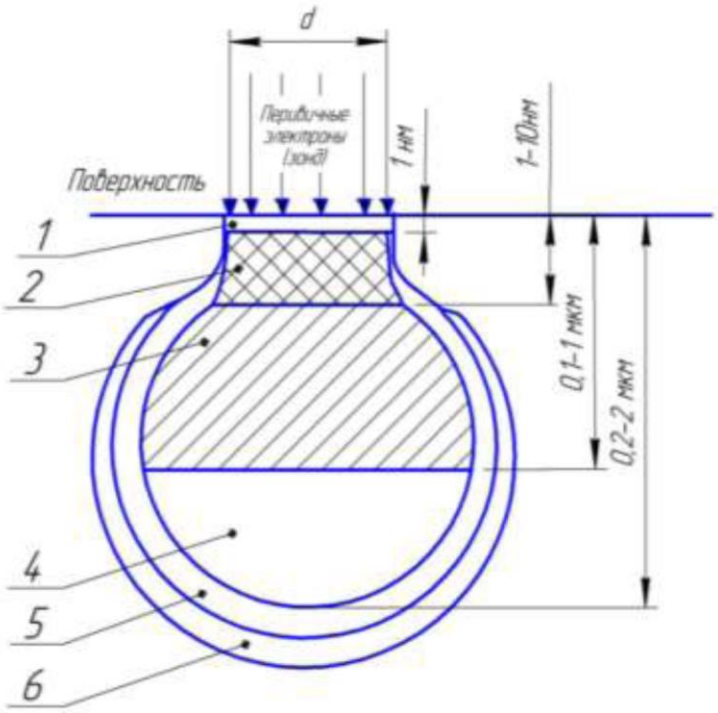


Рисунок 3.5 – Области сигналов и пространственное разрешение при облучении поверхности объекта потоком электронов (зонд).
Области генерации: 1 – Оже-электронов, 2 – вторичных электронов, 3 – отраженных электронов, 4 – характеристического рентгеновского излучения, 5 – тормозного рентгеновского излучения, 6 – флуоресценции.

Анализ распределения элементов может быть выполнен в качественном, полуколичественном и количественном виде. Качественный анализ определяет тип элементов, входящих в состав исследуемого участка образца. Если образец имеет несколько фаз (участков), химический состав которых неизвестен, то выполняется качественный анализ каждой фазы. После качественного анализа часто проводят количественный анализ в отдельно выбранных точках, по полученным данным программное обеспечение позволяет определить тип фазы исходя из ее химического состава. Полуколичественный анализ реализуется, если требуется определить распределение элементов вдоль линий (линейный анализ). Линейный

анализ выполняется методом шагового сканирования, т.е. путем последовательного проведения анализа в отдельных точках. Таким образом, осуществляется количественное определение концентрации элементов с заданной точностью.

3.5 Методика проведения рентгеноструктурного анализа электроэрозионного порошкового материала из алюминия

Для исследования структуры частиц полученных порошков был проведен их рентгеноструктурный анализ на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV.

Рентгеновский дифрактометр Rigaku Ultima IV применяется при исследовании фазового анализ проб, количественного фазового анализ проб, определения областей когерентного рассеяния и микронапряжений, а также для текстурного анализа.

Технические характеристики рентгеновский дифрактометр Rigaku Ultima IV представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технические характеристики Рентгеновский дифрактометр Rigaku Ultima IV.

Параметр	Описание
Источник излучения	Малогабаритный с использованием высокочастотного преобразователя, максимальная мощность – 3кВт, напряжение на трубке – 20-60кВ, ток трубки – 2-60мА, материал анода трубки – Cu , размер фокуса - 0.4 х 12мм.
Щели	С управляемой шириной на выходной и дифрагированный пучок. Два стандартных комплекта щелей Соллера для работы в фокусирующей геометрии и геометрии псевдопараллельного пучка.

Продолжение таблицы 3.2

Гониометр	Θ/Θ вертикального типа, образец неподвижен. Метод сканирования – независимое сканирование каждой оси Θs или Θd; режим сканирования со связанными осями Θs/Θd. Радиус гониометра – 185мм; диапазон углов сканирования в режиме связанных осей Θs/Θd от – 30 до +1620(2Θ); оси Θs от – 1.50 до +810, оси Θd от –950 до +1200; шаг сканирования для оси Θs или Θd 0,0001 – 60; в режиме связанных осей 0,0002 – 120(2Θ). Скорость сканирования в режиме связанных осей Θs/Θd 0.020~1000 (2Θ), независимо каждой оси 0.010~500; скорость позиционирования 5000/мин (2Θ).
Юстировка	Полностью автоматическая для гониометра, амплитудного дискриминатора, счетчика, оптических узлов и дополнительных приставок.
Детектор	Сцинтилляционный счетчик с линейностью 700000имп. (стандарт), однокоординатный полупроводниковый детектор D/teX Ultra с чувствительностью, превышающей чувствительность сцинтилляционного счетчика на два порядка.

Порошок исследуемого образца насыпают в кювету диаметром 20 мм и глубиной 0,5 мм и спрессовывают так, чтобы поверхность образца была параллельна краям кюветы. Кювету ставят в держатель, в результате чего на отъюстированном гониометре поверхность образца совмещается с плоскостью фокусировки.

Параметры съемки: диапазон: 10 – 95 град 2Θ; шаг – 0,020 град, скорость – 1 град/мин, рабочее напряжение – 40 кВ, ток – 40 мА.

Обработка профиля дифрактограммы: программа PDXL; сглаживание – метод Савицкого-Голая; расчет фона – метод Сонневельда-Виссера, поиск пиков – peaktopmethod.

3.6 Методика напыления дефектных головок блока цилиндров

Огромную роль при формировании покрытия играет значение скорости, которую развивает алюмосодержащая частица. Чем выше скорость, тем выше давление в месте контакта частицы с плоскостью и температура, что увеличивает скорость развития химических связей.

Технологическая схема нанесения покрытий представлена на рисунке 3.6.

Рисунок 3.6 – Технологическая схема нанесения покрытий

Автомобильная деталь, поступающая на восстановительные работы, чаще всего находится в технологических загрязнениях (химических, физических, органических и т.д.). Чтобы получить покрытие с высокими эксплуатационными ха-

рактеристиками следуют очищать плоскость головки блока цилиндров от технологических загрязнений. Для этих целей применяли абразивную очистку поверхности с использованием электроэрозионного корунда.

Плоскость дефектной головки блока цилиндров при поступлении в ремонт находится в термическом равновесии. Поэтому очень важным этапом является выведение плоскости ГБЦ из этого состояния. Для нарушения термического равновесия нужно разорвать образованные взаимосвязи между поверхностными атомами плоскости ГБЦ и инородными атомами, а также увеличить энергию атомов находящихся на плоскости до требуемого уровня, обеспечивающего их хи мическое взаимодействие с наносимыми алюмосодержащими частицами. Причем активация плоскости ГБЦ существенно увеличивается с образование структурных дефектов. Очистку плоскости ГБЦ абразивными частицами необходимо производить так, чтобы вместе с удалением загрязнений происходила активация поверхности.

Кроме того, абразивная очистка позволяет увеличить шероховатость плоскости ГБЦ, которая препятствует развитию касательных напряжений и увеличивает площадь контакта.

Следует учесть тот факт, что нужно избежать попадания загрязнений на подготовленную поверхность, браться за нее можно только в перчатках.

При проведении восстановительных работ используются вспомогательные приспособления, к которым относится оборудование, необходимое для формирования единообразного газодинамического покрытия по всей плоскости ГБЦ. (ГБЦ необходимо прочно закрепить).

К вспомогательным приспособлениям относятся маски, закрывающие места плоскости на которые нельзя производить напыление.

На плоскости ГБЦ часто образуются трещины в областях, имеющих наибольшее значение градиента температур. Трещина может образоваться в результате воздействия больших температур. Чаще всего, это происходит из-за частых перегревов двигателя. Вначале, это будет микротрещина, которая постепен-

но будет разрастаться. О ее присутствии будет говорить наличие в охлаждающей жидкости остатков масла и появление соответствующих пузырей в бачке. Трещина в ГБЦ нарушит герметизацию клапанного механизма, из-за этого произойдет ослабление посадочных мест большинства деталей. Произойдет уменьшение мощности двигателя. Каждая трещина в ГБЦ, даже небольшая, представляет собой потенциальную опасность. Являясь концентратором напряжений, она с течением времени развивается. Увеличиваясь в размерах, трещина опасна не только уменьшением механической прочности головки. Но наиболее угрожающие последствия для работоспособности двигателя возможны в тех случаях, когда развитие трещины приводит к нарушению герметичности проходящих внутри головки каналов систем смазки и охлаждения.

При постановке экспериментов по газодинамическому напылению головки блока цилиндров двигателя ЗМЗ-406 использовалась установка ДИМЕТ – 404 (рисунок-3.7).

Рисунок 3.7 – Установка для газодинамического напыления

Рисунок 3.8– Рабочее место, используемое при восстановлении дефектных ГБЦ способом газодинамического напыления

Последовательность операций представлена ниже.

Подготовка к напылению производится в следующе последовательности:

1). Вымыть ГБЦ горячим щелочным раствором, чтобы увидеть все трещины. В нашем случае трещина располагается между седлами выпускных клапанов.

2. Удлинить дефектную область. Трещину следует как можно глубже расчистить с применением фрезы или сверла, чтобы максимально избавиться от следов трещины и придать ей более правильную геометрическую форму.

3. Закрыть каналы защитными крышками, чтобы избежать попадания в них порошка.

Затем производится напыление ПМ на дефектную поверхность в следующей последовательности:

1. Установить установку на рабочее место.

2. Подключить воздух, используя специальный разъем.

4. Включить защитный автоматический выключатель.

5. Полностью открыть кран для напыления.

6. Включить подачу воздуха в сопло клавишей «Воздух»

7. Вращая рукоятку регулятора установить давление воздуха 0,5 МПа, после чего зафиксировать рукоятку.

8. Соединить гибкую трубку подачи порошка, идущую от напылителя, с гибкой трубкой, идущей от переключателя ПМ.

9. Засыпать ПМ в бункеры питателей установки ДИМЕТ-404. В бункер №1 засыпается порошковый материал корунда, а в бункер №2 алюмосодержащий порошковый материал.

10. Выставить на панели установки расход порошка – 0,2 г/с и температурный режим №3.

11. Выбрать питатель №1 на панели управления установки и произвести абразивную очистку установкой ДИМЕТ-404 с применением порошкового материала корунда.

12. Выбрать питатель №2, нанесение алюмосодержащего порошкового материала выполняется на расстоянии 10-15 мм. Пистолет в этот момент держится под углом 90-45°.

Затем выполняется фрезерование поверхности ГБЦ на вертикально-фрезерном станке 6Н11. Во время фрезерования плоскость ГБЦ нужно следить за метками, которые показывают максимальный предел удаления, метала.

После операции фрезерования необходимо вымыть ГБЦ для удаления технологических загрязнений и провести контроль качества восстановленной ГБЦ.

Контроль качества восстановленных автомобильных деталей является обязательным компонентом технологической операции, обеспечивающая ее надежность в промышленном производстве.

Контроль внешнего вида осуществляется посредством визуального осмотра с целью выявления наличия либо отсутствия сколов, трещин или отслоений по-

крытия, а также сравнение цвета газодинамический покрытий с эталоном. При необходимость можно использовать лупу с увеличением до 10 и более.

Контроль плоскостности поверхности прилегания к блоку цилиндров осуществляется с помощью линейки ШП-2-630 ГОСТ 8026-7.

Также проверяется герметичность ГБЦ на стенде для опрессовки ГБЦ «УГ1200».

На рисунке 3.9 представлена головка блока цилиндров двигателя ЗМЗ – 406: а – до восстановления, б – после восстановления нанесением алюмосодержащего ПМ без зачистки и шлифования.

а)

б)

Рисунок 3.9 – Восстановление ГБЦ:
а – до восстановления; б – после восстановления нанесением алюмосодержащего ПМ без зачистки и шлифования

Значительное число отказов имеет место в случае образования раковин на поверхности головки блока цилиндров. Отклонение от плоскости поверхности прилегания к блоку цилиндров отражается на качестве уплотнений, так как головка цилиндров представляет собой жесткую деталь коробчатого типа. По разработанному технологического процессу можно восстанавливать неисправные ГБЦ с

такими дефектами как образование раковин на плоскости, прилегающей к блоку цилиндров (рисунок 3.10).

На рисунке 3.10 показан процесс восстановления головки блока цилиндра а – до восстановления, б – после нанесения покрытия газодинамическим напылением.

а) б)

Рисунок 3.10 – Процесс восстановление ГБЦ:

а – до восстановления; б – после нанесения покрытия газодинамическим напылением

3.7 Методика исследования влияние параметров восстановления дефектных головок блоков цилиндров на пористость газодинамических покрытий

Коррозионная стойкость, электроизоляционные и другие свойства покрытий в значительной степени зависят от пористости. Поэтому при оценке качества газодинамических покрытий определение пористости имеет большое значение.

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

Напыление производилось способом газодинамического напыление на установке ДИМЕТ-404. Для напыления использовались порошковые материалы,

полученные способом электроэрозионного диспергирования 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.

Пористость определяли с помощью оптического инвертированного микроскопа Olympus GX51 с программным обеспечением для количественного анализа изображения. Подготовленные образцы не имели следов шлифования, полирования или выкрашивания структурных составляющих. Шлиф изготовляли поверхности целого изделия или части его площадью < 2 см^2. ПО “SIAMS Photolab”, которым оснащен микроскоп, разработано с учётом специфики применения методов цифровой микроскопии и анализа изображений для металлографического анализа соединений.

По экспериментальным данным строили графики зависимости пористости газодинамических покрытий от давления воздуха, расхода порошкового материала и среднего размера напыляемых частиц.

3.8 Методика исследования микроструктуры и рентгеноспектрального микроанализа, газодинамических покрытий

Методом растровой электронной микроскопии было проведено исследование микроструктуры образцов (по поверхности и по поперечному шлифу). По-

верхность (по шлифу) образцов шлифовали и полировали. Шлифование производили металлографической бумагой с крупным (№№ 60-70) и мелким зерном (№№ 220-240). В процессе шлифования образец периодически поворачивали на 90°. Смывали частицы абразива водой и подвергали полированию на круге суспензиями из оксидов металла (Fe_3O_4, Cr_2O_3, Al_2O_3). После достижения зеркального блеска, поверхность шлифа промывали водой, спиртом и просушивали фильтровальной бумагой.

Рентгеноспектральный анализ покрытий, полученных способом газодинамического напыления выполнен с помощью энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы EDAX, встроенного в растровый электронный микроскоп QUANTA 600 FEG (методика описана была ранее в пункте 3.4).

С помощью энерго-дисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы EDAX, были получены спектры характеристического рентгеновского излучения в различных точках на поверхности образца и по поперечному шлифу.

3.9 Методика исследования твердости и адгезионной прочности газодинамических покрытий

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). Образец подводили к индентору, затем вдавливали индентор в образец с плавно нарастающей нагрузкой, после достижения максимальной величины, нагрузка на индентор выдерживалась в интервале времени 15 секунд, затем снимали приложенную нагрузку, отводили образец от индентора и измеряли диаметр получившегося отпечатка. Диаметр стального индентора 5 мм.

Для испытания образцов с целью определения адгезионной/когезионной прочности, стойкости к царапанью и определения механизма разрушения исполь-

зовали скретч-тестер Revetest (CSM Instruments), схема которого показана на рисунке 3.11. Для определения адгезионной прочности покрытия на поверхность алмазным сферическим индентором типа «Роквелл С» с радиусом закругления 200 мкм наносили царапины при непрерывно нарастающей нагрузке по схеме, приведенной на рисунке 3.12, и осуществляли регистрацию физических параметров: акустической эмиссии, коэффициента трения и глубины проникновения индентора.

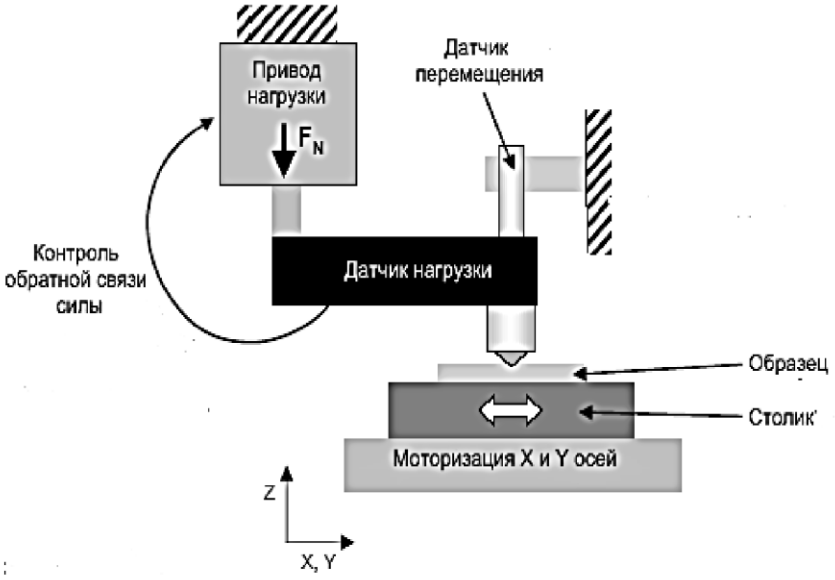


Рисунок 3.11 – Схема «Скретч-тестер Revetest»

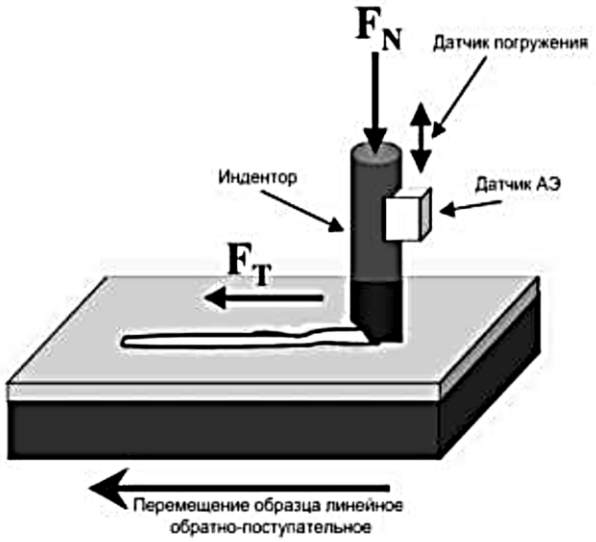


Рисунок 3.12 – Схема испытания на приборе Revetest

Образец устанавливали на столик, перпендикулярно плоскости образца закрепляли алмазный сферический индентор типа «Роквелл С» с радиусом закругления 200 мкм. Испытания были проведены при следующих условиях: нагрузка на индентор нарастала от 0,9 до 190 Н, скорость – 1 мм/мин, длина царапины составила 10 мм, скорость нагружения – 18,91 Н/мин, акустическая эмиссия – 6.

Момент адгезионного или когезионного разрушения покрытия фиксировали после испытаний визуально с помощью оптического микроскопа, оборудованного цифровой камерой, а также по изменению коэффициента трения. В результате испытаний определяли минимальную (критическую) нагрузку L_c, которая приводила к разрушению покрытия. Дополнительно для определения характера разрушения при высокой нагрузке было проведено исследование микроструктуры поверхности образцов после адгезионных испытаний с помощью электронно-ионного сканирующего микроскопа Quanta 200 3D.

3.10 Методика исследования рентгеноструктурного микроанализа газодинамических покрытий

Исследование фазового состава образцов проводили методом рентгеновской дифракции на дифрактометре Rigaku Ultima IV в излучении Cu-Kα (длина волны λ = 0.154178 нм) с использованием щелей Соллера. Съемку дифракционного спектра для фазового анализа проводят по схеме θ-2Θ сканирования с фокусировкой по Брегу-Брентано в интервале углов 5…100 град. 2 Θ. Съемку осуществляют в поточечном режиме с шагом сканирования $\Delta(2\theta)$ = 0,02 град, скоростью 0,6 град/мин, рабочее напряжение 45 кВ, ток 200 мА. Для уточнения профиля экспериментальных рентгенограмм использовали программный пакет PDXL RIGAKU. Вычитание фона проводили методом Сонневельда – Виссера, сглаживание экспериментального профиля методом Савицкого – Голая, разделение компонент kα1 и kα2 методом Рачингера. Для описания дифракционных максимумов

использовали суперпозицию функции Гаусса и функции Лоренца. Аппроксимация каждого из рефлексов на дифрактограммах исследуемых образцов функцией псевдо – Войгта позволила точно определить положение рефлексов с учетом смещения, вызванного перекрытием рефлексов, на половине максимума интенсивности (FWHM) и интенсивность. Фазовый состав покрытий определяли с помощью БД ICCD PDF-2 (2014).

3.11 Методика исследования коррозионной стойкости газодинамических покрытий

Испытания коррозионной стойкости газодинамических покрытий проводили по методике ускоренных испытаний с помощью многоканального потенциостат-гальваностата «Elins P-20X8». Потенциостат – гальваностат P-20X8 внесен в Государственный Реестр Средств измерений Российской Федерации (Госреестр СИ РФ) под регистрационным номером 70702-18. Методика поверки МП 206.1-001-2018, межповерочный интервал составляет 2 года. Также прибор сертифицирован по системе сертификации ГОСТ Р. Сертификат соответствия № РОСС RU.АД44.Н04368.

Многоканальный потенциостат-гальваностат «P-20X8» состоит из восьми идентичных, полностью независимых каналов – потенциостатов. Каждый канал может выполнять свою, не связанную с другими каналами, задачу. Но чаще всего одновременно работа ведется с несколькими однотипными ячейками.

Многоканальный потенциостат «P-20X8» идеально подходит для рутинных многодневных испытаний малогабаритных химических источников тока, например циклического заряда – разряда аккумуляторов или суперконденсаторов. Единственный диапазон потенциала каждого канала 6 вольт специально выбран таким образом, чтобы максимально соответствовать требованиям работы с литиевыми системами без каких либо ограничений, например, при испытании окна

электрохимической стабильности электролита в широком диапазоне потенциалов, или для работы с литиевыми электродами в широком интервале поляризации.

Отличительной особенностью этого прибора является то, что он является именно потенциостатом, а не зарядно-разрядным устройством, то есть этот прибор специально создавался для работы не только с двух, но и с трехэлектродными ячейками с электродом сравнения.

Для обеспечения высокой надежности многодневной работы, каждый канал имеет свою энергонезависимую память для хранения всех зарегистрированных экспериментальных данных. Также, рабочая программа, все критерии остановки эксперимента и защит контролируются каждым каналом индивидуально, что обеспечивает максимально быструю и надежную реакцию потенциостата на события и измерения в тестируемой электрохимической ячейке.

Помимо всех достоинств прибора для многодневных рутинных испытаний ХИТ, многоканальный потенциостат «Р20Х8» может успешно справляться и с классическими электрохимическими исследовательскими задачами. Например, можно проводить эксперименты по электрокатализу, коррозии, электроосаждению или электросинтезу с целью испытания групповых однотипных образцов при варьировании условий эксперимента – выбрать различные рабочие потенциалы или плотности тока для одинаковых образцов, или варьировать состав композитных электродов или электролитов. При этом, одновременно можно приготовить и испытать достаточно большую серию – сразу 8 образцов, а не загружать их по очереди по одному.

Преимущества применения многоканального потенциостата-гальваностата по сравнению с несколькими одноканальными приборами:

–максимально низкая стоимость одного канала потенциостата позволяет сократить расходы на комплектацию лаборатории оборудованием;

–существенное сокращение рабочего времени при испытании большого количества серии однотипных образцов за счет большого, количества каналов;

– удобство работы со множеством однотипных образцов как на этапе созда-

ния рабочей программы, так и на этапе измерения, так как удельное время подготовки, запуска и программирования работы одного образца при этом оказывается заметно меньше;

– компактизация и улучшенная организация рабочего места для работы с большим количеством образцов;

– удобство подключения и установки одного многоканального прибора вместо нескольких одноканальных,

– для работы нескольких каналов требуется только один компьютер.

В таблицы 3.3 представлены основные характеристики потенциостат-гальваностат «Elins P-20X8»

Таблица 3.3 – Основные характеристики потенциостат-гальваностат «Elins P-20X8»

Количество каналов	8
Максимальное напряжение (В)	10
Ток (А)	2
Количествово диапазонов тока	5
Скорость развертки до (В/с)	10
Скорость регистрации (точек/с)	200
Возможность установки модуля импеданса (FRA)	нет

Электрохимические измерения выполнялись с использованием многоканального потециостата-гальваностата Elins «P-20X8» (Элинс, Россия) с программным обеспечением ES8. В качестве рабочего раствора использовали 3,5% NaCl. В качестве электрода сравнения был использован электрод ЭСр-10101 (Ag/AgCl/KCl), концентрация KCl в потенциалообразующем полуэлементе 4,2 моль/дм^3. Электрод сравнения был соединен с рабочим раствором через электролитический ключ (мостик). Площадь исследуемой поверхности составила 1 см^2. Объем используемого рабочего раствора для каждого образца составлял 1 л. Время измерения составляло 5 ч.

На первом этапе проводили измерение потенциала разомкнутой цепи $E_{рц}$.

После измерения $E_{рц}$ с образцов была снята вольт-амперная характеристика по трехэлектродной схеме. В качестве вспомогательного электрода использовали высокочистый графит. Шаг развертки составлял 1 мВ. Далее анализировали полученные анодные поляризационные кривые I(E). На следующем этапе полученные поляризационные кривые перестраивали по методу экстраполяции Тафеля и по пересечению аппроксимаций участков графиков определяли потенциал и ток коррозии.

3.12 Методика исследования на устойчивость к воздействию температуры газодинамических покрытий

Испытание проводят с целью проверить способность изделий сохранять внешний вид и значения параметров в пределах, установленных в стандартах и технических условиях на изделия и программах испытаний, в условиях и после воздействия верхнего значения температуры среды.

Исследование на устойчивость к воздействию температуры было проведено по ГОСТу Р 51368-99 (метод 205-2. Постепенное изменение температуры «метод одной камеры»).

Испытание проводились без нагрузки.

Образцы выдерживают в нормальных климатических условиях испытаний в течение двух часов, проводился визуальный осмотр покрытий на наличие повреждений.

Затем образцы подвергали воздействию двух непрерывно следующих друг за другом циклов. Каждый цикл состоит из следующих этапов:

а) образец помещали в термокамеру, после чего значение температуры в камере понижали до - 30°С и выдерживали при этой температуре в течение двух часов;

б) значение температуры в камере повышали до +110°С и выдерживали при

этой температуре в течение двух часов.

Значения скоростей охлаждения и нагрева камеры, усредненные за период не более 5 мин, устанавливали 1 °С/мин.

После окончания второго цикла образцы извлекали из камеры и выдерживали в нормальных климатических условиях испытаний в течение двух часов.

Затем проводили визуальный осмотр газодинамических покрытий.

Климатическая камера для испытаний в условиях переменных высоких и низких температур и влажности КХТВ-1-00. Основные области применения: температурные испытания, климатические испытания в соответствии с международными стандартами в течение заданного времени в ходе выполнения программ испытаний, параметров составных частей и готовых изделий, свойств материалов в зависимости от температуры и влажности, биологических процессов при постоянных и переменных климатических условиях, стрессовые испытания материалов и составных частей изделий. Климатические испытательные камеры предназначены для создания искусственных климатических условий, максимально приближенных к условиям применения или эксплуатации испытываемых изделий.

Камера для испытаний в условиях переменных высоких и низких температур и влажности КХТВ-1-005, позволяет решать ряд научно-исследовательских задач, таких как проведение температурных испытаний, климатических испытаний в течение заданного времени в ходе выполнения программ испытаний, параметров составных частей и готовых изделий, свойств материалов в зависимости от температуры и влажности, биологических процессов при постоянных и переменных климатических условиях, стрессовых испытаний материалов и составных частей изделий. Испытания могут быть использованы для выявления лучшего материала при заданных условиях эксплуатации, и для прогнозирования срока службы и эксплуатационных затрат.

Основные параметры камера для испытаний в условиях переменных высоких и низких температур и влажности КХТВ-1-005:

– объём 1000 л;

– габариты рабочей зоны (ВхШхГ) 1000х1000х1000 мм;

– внешние размеры (ШхГхВ) 1250х1800х2245 мм;

– диапазон температур -65°С ~ +150°С.

– диапазон влажности 20 ~ 98%.

– точность поддержания температуры по времени ± 0,4ºС.

– равномерность поддержания температуры по объему ± 1,8ºС.

– точность поддержания относительной влажности ± 2,5%RH.

– равномерность распределения внутри камеры +/-1°С;+/-3%RH.

– скорость набора температуры 1,0…3,0ºС/мин.

– скорость сброса температуры 0,7…1,0ºС/мин.

– система электропитания 380 В ± 38 В переменного тока, 50Гц ± 0,5 Гц 3-фазная, потребляемая мощность 10 кВт.

– система охлаждения: воздушная.

– материал рабочего объема – нержавеющая сталь.

3.13 Выводы к главе 3

1. Наиболее перспективным способом для получения порошкового материала используемого при восстановлении дефектных головок блоков цилиндров, практически из любого токопроводящего материала, в том числе и отходов алюминия, является способ электроэрозионного диспергирования, отличающийся экологической чистотой (отсутствие стоков, газовых и пылевых выбросов), низкой удельной энергоемкостью процесса (1,5-3 кВт для производства 1 кг ПМ), компактностью технологического оборудования (8-10 м^2 на одну установку).

2. Представлены этапы получения алюмосодержащего порошкового материала, а также методики и оборудование на котором проводились исследования свойств ПМ:

– методика исследования гранулометрического состава ПМ;

– методика исследований формы и морфологии поверхности частиц ПМ;

– методика проведения рентгеноспектрального микроанализа ПМ;

– методика проведения рентгеноструктурного анализа ПМ.

3. Представлена методика напыления дефектных ГБЦ, а также методы и оборудование, на которых проводились исследования свойств и качества газодинамических покрытий:

– методика исследования микроструктуру и рентгеноспектрального микроанализа, газодинамических покрытий;

– методика исследования рентгеноструктурного микроанализа, газодинамических покрытий;

– методика исследования твердости и адгезионной прочности газодинамических покрытий.

– методика исследования коррозионной стойкости газодинамических покрытий;

– методика исследования на устойчивость к воздействию температуры газодинамических покрытий.

4. Для изучения свойств и состава алюмосодержащего ПМ полученного способом электроэрозионным диспергированием отходов алюминия в воде дистиллированной, а также покрытий, полученных способом газодинамического напыления необходимо провести комплексное исследование на оборудовании, которое представленном в этой главе.

ГЛАВА 4

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Результаты исследования гранулометрического состава электроэрозионного порошкового материала из алюминия

На рисунке 4.1и в таблицах 4.1, 4.2 представлены результаты исследования гранулометрического состава алюмосодержащего ПМ, полученного при следующих электрических параметрах: емкость разрядных конденсаторов 65 мкФ; напряжение 90 В; частота импульсов 50 Гц.

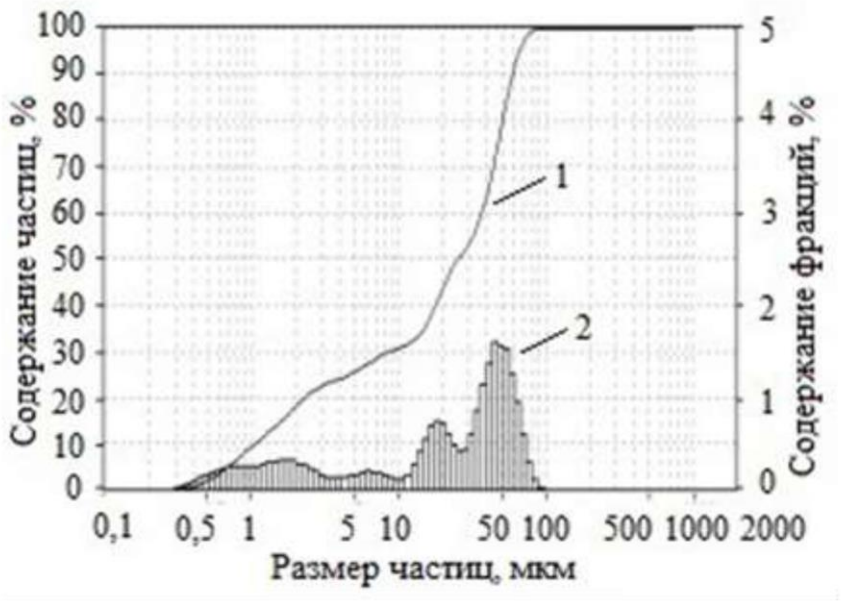


Рисунок 4.1 – Распределение по размерам микрочастиц образца алюмосодержащего ПМ
1 – Интегральная кривая; 2 – Гистограмма.

На рисунке 4.1 представлены интегральная кривая – 1 и гистограмма – 2: интегральная кривая (левая шкала) – каждая точка на кривой показывает, сколько % образца имеет размер частиц меньше либо равный данному. Гистограмма (правая шкала) указывается количество образца с данным размером частиц. Из гистограммы видно, что распределение частиц алюмосодержащего ПМ находится в пределах 0,4-100 мкм. Установлено, что средний размер частиц ПМ составляет

28,5 мкм, арифметическое значение – 28,503 мкм, удельная площадь поверхности – 16266,5 см^2/см^3.

Количество частиц ПМ заданного интервала размеров в процентном соотношении представлено в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Количество частиц ПМ заданного интервала размеров, %

Размер порошка, мкм	Процентное содержание, %
0,050 – 1,000	9,14
1,000 – 2,000	9,00
2,000 – 3,000	4,23
3,000 – 4,000	1,73
4,000 – 5,000	1,41
5,000 – 10,000	5,20
10,000 – 20,000	13,35
20,000 – 50,000	34,98
50,000 – 100,000	20,96
100,000 – 200,000	0,02

В таблице 4.2 показано, что значимую часть алюмосодержащего ПМ (34,98%) занимают частицы, размер которых находится в интервале от 20,000 до 50,000 мкм.

Таблица 4.2 − Результаты исследования распределения по размерам частиц

Фракционный состав, %	Размер частиц меньший или равный указанному, мкм
5	0,683
10	1,079
15	1,596
20	2,327

Продолжение таблицы 4.2

25	4,651
30	8,813
35	14,743
40	17,626
45	20,600
50	25,489
55	32,413
60	36,839
65	40,489
70	43,857
75	47,081
80	50,709
85	54,669
90	59,527
95	66,378
99	78,908

Из представленной таблицы 4.2 видно, что максимальный размер частиц алюмосодержащего ПМ, полученного электроэрозионным диспергированием в дистиллированной воде при следующих электрических параметрах: емкость разрядных конденсаторов 65 мкФ; напряжение 90 В; частота импульсов 50 Гц, не превышает 79 мкм, также видно что 50% частиц имеют размер менее 25,489 мкм и 10 % частиц имеют размер менее 1,079.

Экспериментально установлено, что коэффициент элонгации (удлинения) частиц размером 25,489 мкм составляет 1,245, что говорит о сферической форме частиц алюмосодержащего ПМ.

На рисунке 4.2 и в таблицах 4.3, 4.4 представлены исследования гранулометрического состава алюмосодержащего ПМ полученного при следующих элек-

трических параметрах: емкость разрядных конденсаторов 65 мкФ; напряжение 100 В; частота импульсов 140 Гц.

На рисунке 4.2 представлены интегральная кривая –1 и гистограмма – 2. Интегральная кривая (левая шкала) – каждая точка на кривой показывает, сколько % образца имеет размер частиц ПМ меньше либо равный данному. Гистограмма (правая шкала) указывается количество образца с данным размером частиц. Из гистограммы видно, что распределение алюмосодержащих частиц находится в пределах 0,4-80 мкм. Установлено, что средний размер частиц составляет 19,96 мкм, арифметическое значение – 19,961 мкм, удельная площадь поверхности – 21621,56 см^2/см^3.

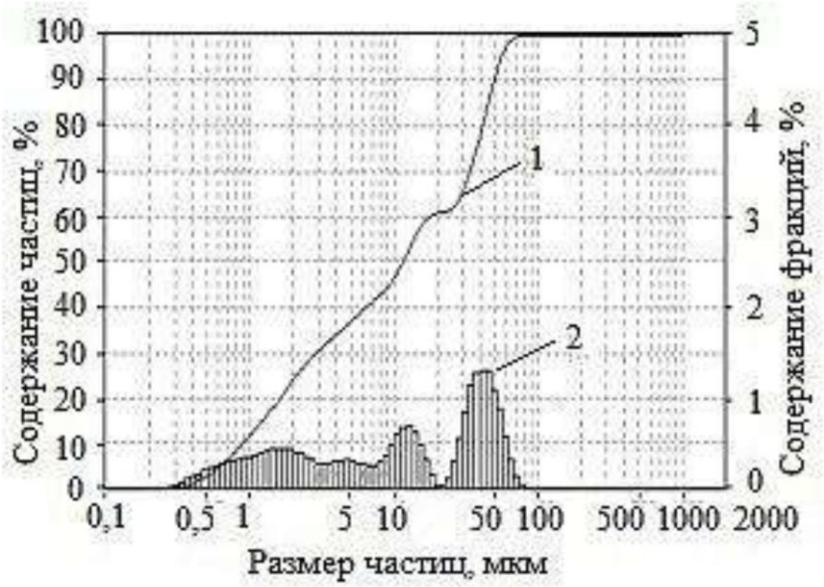


Рисунок 4.2 – Распределение по размерам микрочастиц алюмосодержащего ПМ

Таблица 4.3 − Результаты исследования распределения по размерам частиц

Фракционный состав, %	Размер частиц меньший или равный указанному, мкм
5	0,616
10	0,899
15	1,230

Продолжение таблицы 4.3

20	1,604
25	2,093
30	2,906
35	4,337
40	6,368
45	9,337
50	11,445
55	13,560
60	17,338
65	30,046
70	34,031
75	37,474
80	40,968
85	44,722
90	49,216
95	55,418
99	66,338

Из представленной таблицы 4.3 видно, что максимальный размер частиц алюмосодержащего ПМ, полученного электроэрозионным диспергированием в дистиллированной воде при следующих электрических параметрах: емкость разрядных конденсаторов 65 мкФ, напряжение 100 В, частота импульсов 140 Гц, не превышает 67 мкм, также видно что 50% частиц имеют размер менее 11,445 мкм и 10 % частиц имеют размер менее 0,9 мкм.

Количество частиц заданного интервала размеров в процентном соотношении представлено в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Количество частиц заданного интервала размеров, %

Размер порошка, мкм	Процентное содержание, %
0,050-1,000	11,6
1,000-2,000	12,64
2,000-3,000	6,14
3,000-4,000	3,57
4,000-5,000	2,99
5,000-10,000	9,53
10,000-20,000	14,30
20,000-50,000	29,98
50,000-100,000	9,25
100,000-200,000	0,00

В таблице 4.4 показано, что значимую часть алюмосодержащего ПМ (29,98%) занимают, частицы размер которых находится в интервале от 20,000 до 50,000 мкм., а также что 90 % частиц алюмосодержащего ПМ имеют размер менее 50 мкм.

Экспериментально установлено, что коэффициент элонгации (удлинения) частиц размером 11,445 мкм составляет 1,80, что говорит о сферической форме частиц алюмосодержащего ПМ.

Информация дифракционных картин может использоваться не только для определения размера частиц, но и для анализа их формы.

Частицы несферической формы рассеивают излучение в их предпочтительных пространственных направлениях. Если в лазерный пучок попадает не слишком большое количество частиц, на основе получаемой информации может выполняться анализ их формы.

4.2 Результаты исследования формы и морфологии частиц порошкового материала из алюминия

На рисунках 4.3 – 4.6 представлены снимки алюмосодержащего ПМ, полученного при следующих электрических параметрах: емкость разрядных конденсаторов 65 мкФ; напряжение 90 В; частота импульсов 50 Гц.

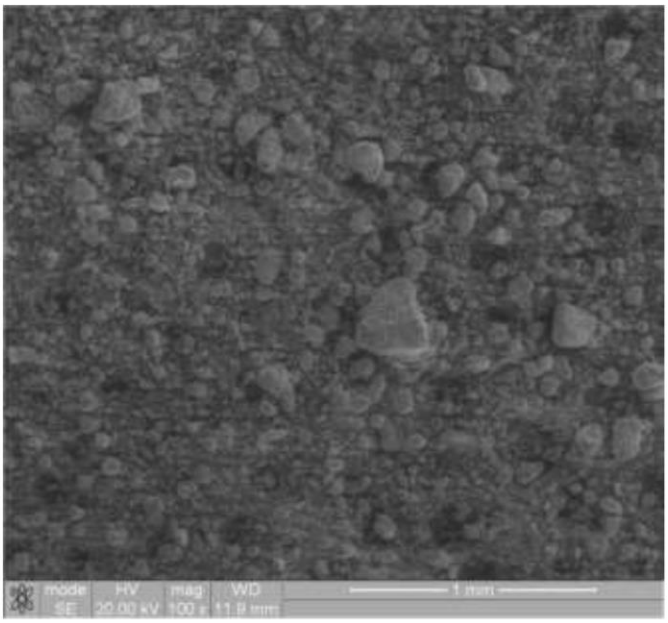


Рисунок 4.3 – Алюмосодержащий ПМ (увеличение 100)

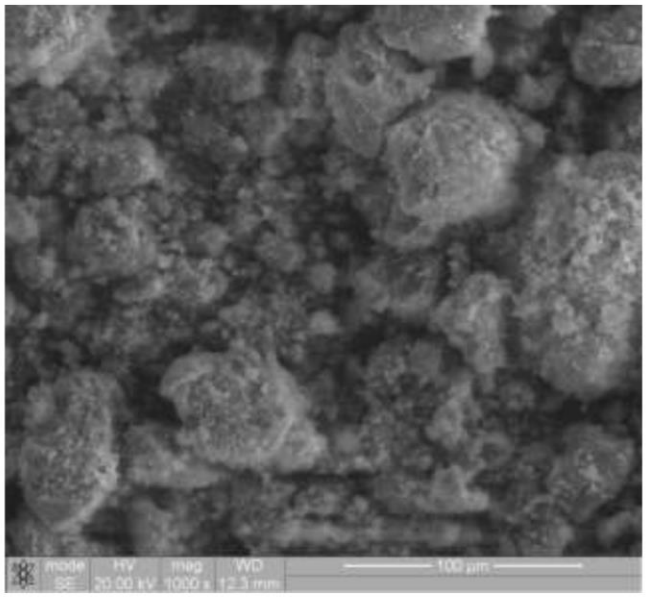


Рисунок 4.4 – Алюмосодержащий ПМ (увеличение 1000)

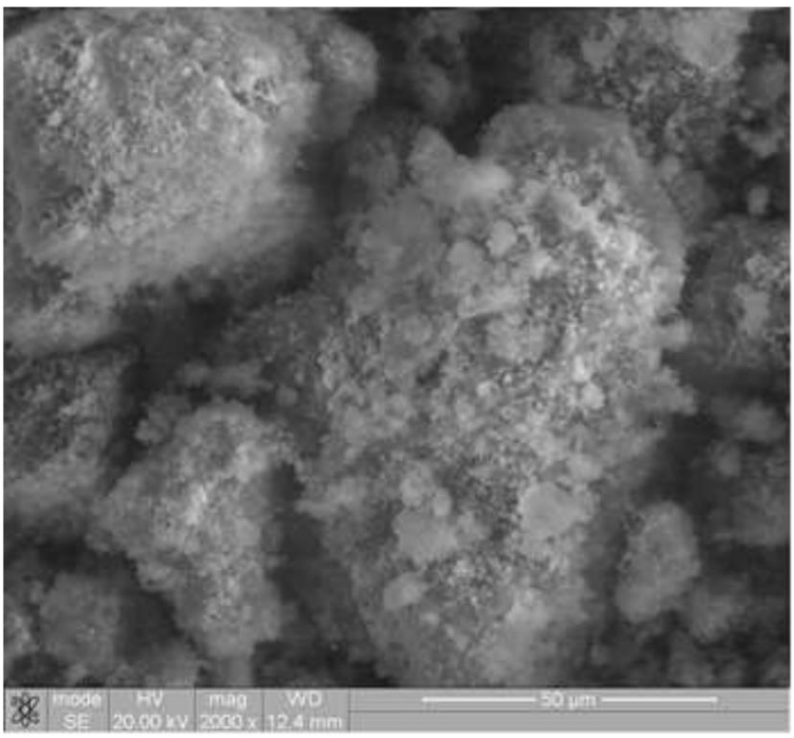


Рисунок 4.5 – Алюмосодержащий ПМ (увеличение 2000)

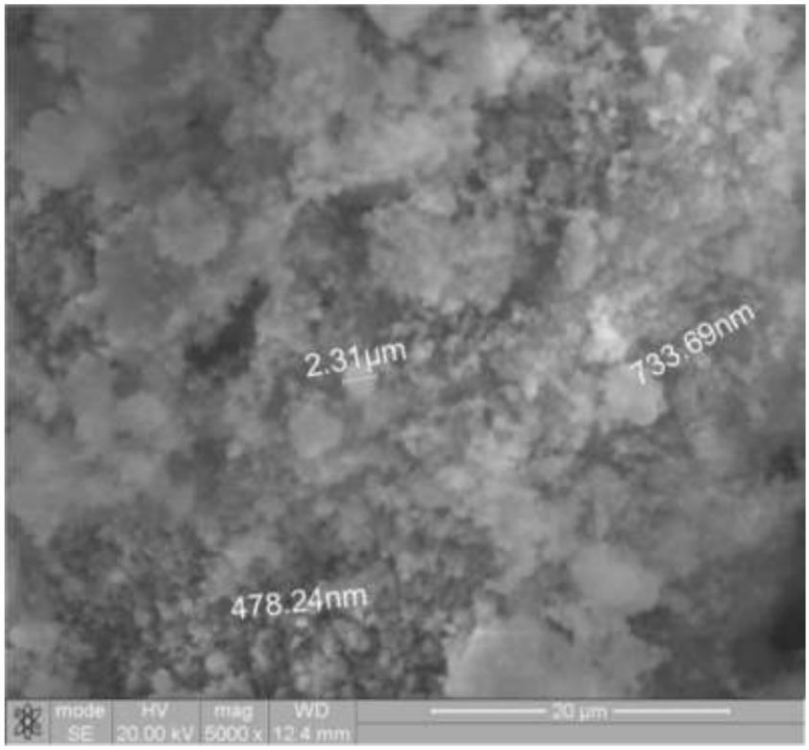


Рисунок 4.6 – Алюмосодержащий ПМ (увеличение 5000)

На рисунках 4.7 – 4.10 представлены снимки алюмосодержащего ПМ, полученного при следующих электрических параметрах: емкость разрядных конденсаторов 65 мкФ; напряжение 100 В; частота импульсов 140 Гц.

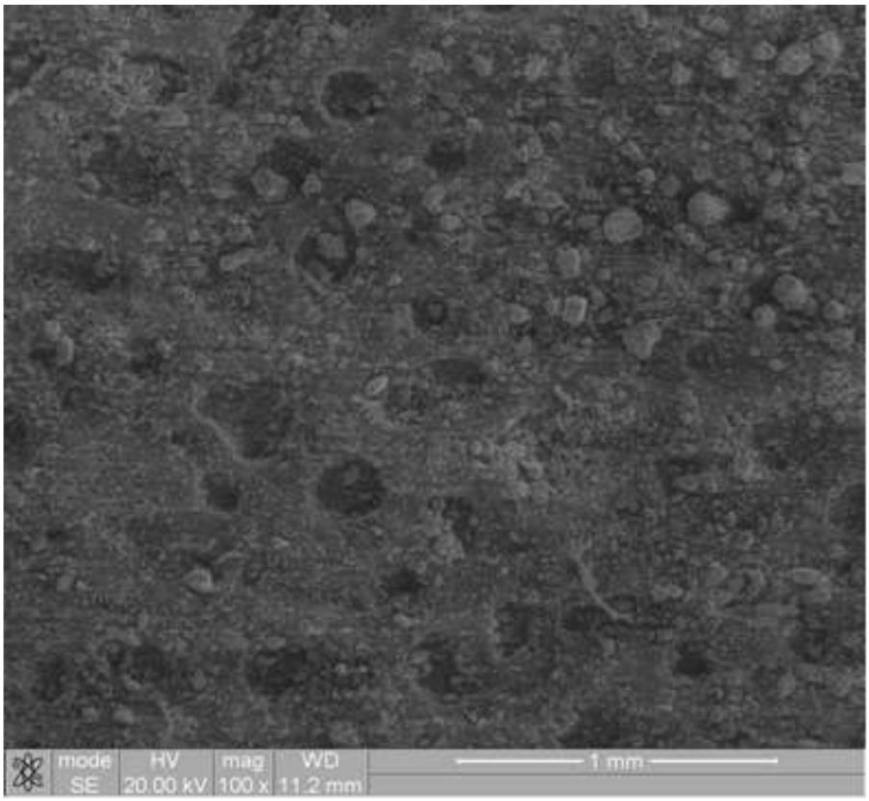


Рисунок 4.7 – Алюмосодержащий ПМ (увеличение 100)

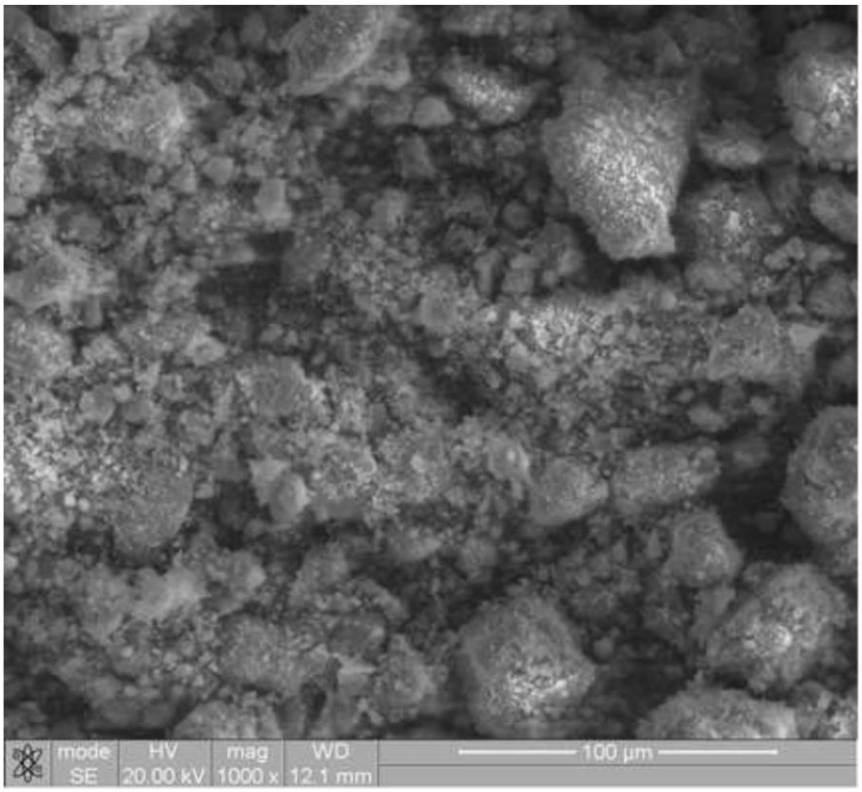


Рисунок 4.8 – Алюмосодержащий ПМ (увеличение 1000)

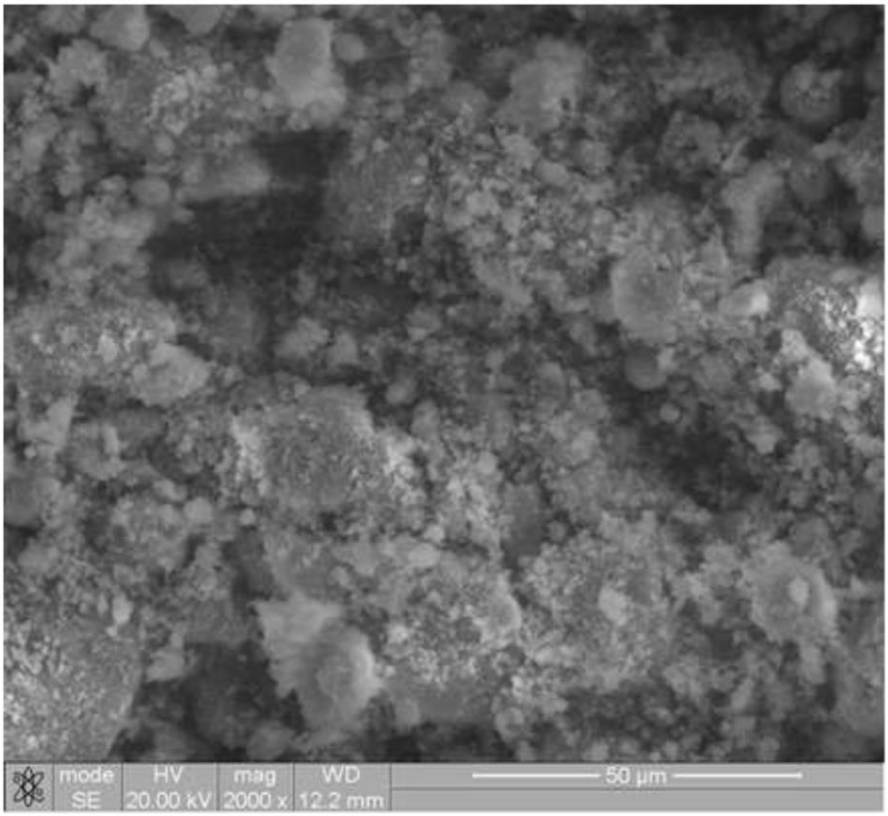


Рисунок 4.9 – Алюмосодержащий ПМ (увеличение 2000)

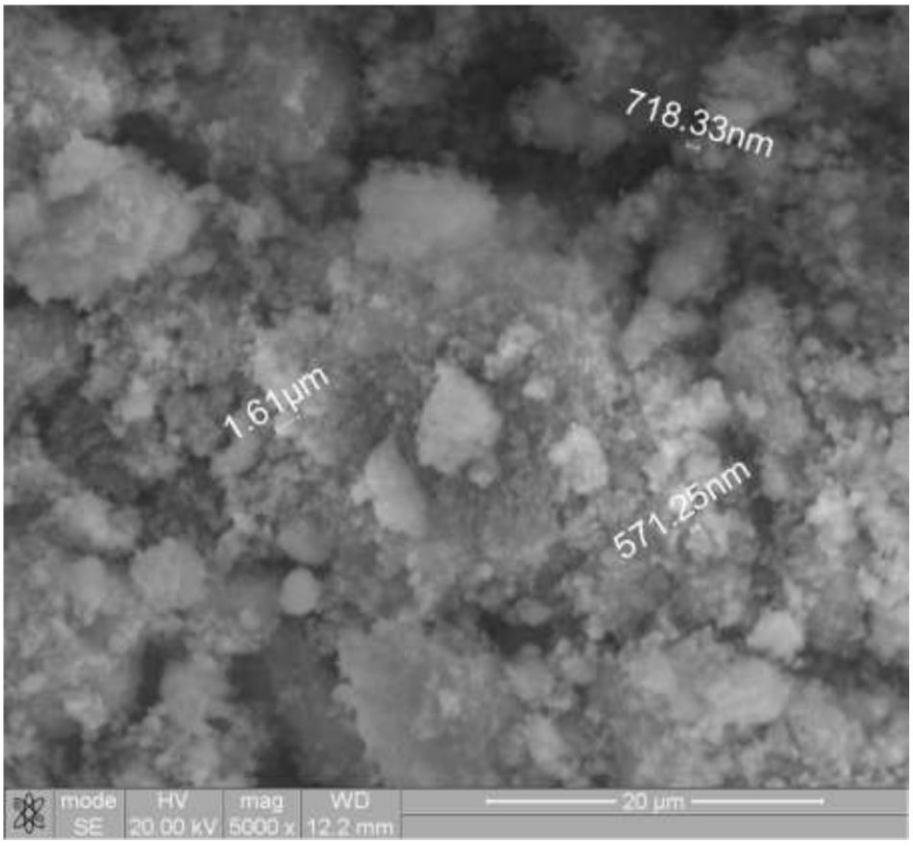


Рисунок 4.10 – Алюмосодержащий ПМ (увеличение 5000)

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

4.3 Результаты исследования рентгеноспектрального микроанализа частиц порошкового материала из алюминия

Результаты рентгеноспектрального микроанализа частиц алюмосодержащего ПМ, проведенного с помощью энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы EDAX, встроенного в растровый электронный микроскоп QUANTA 600 FEG, представлены ниже (рисунок 4.11).

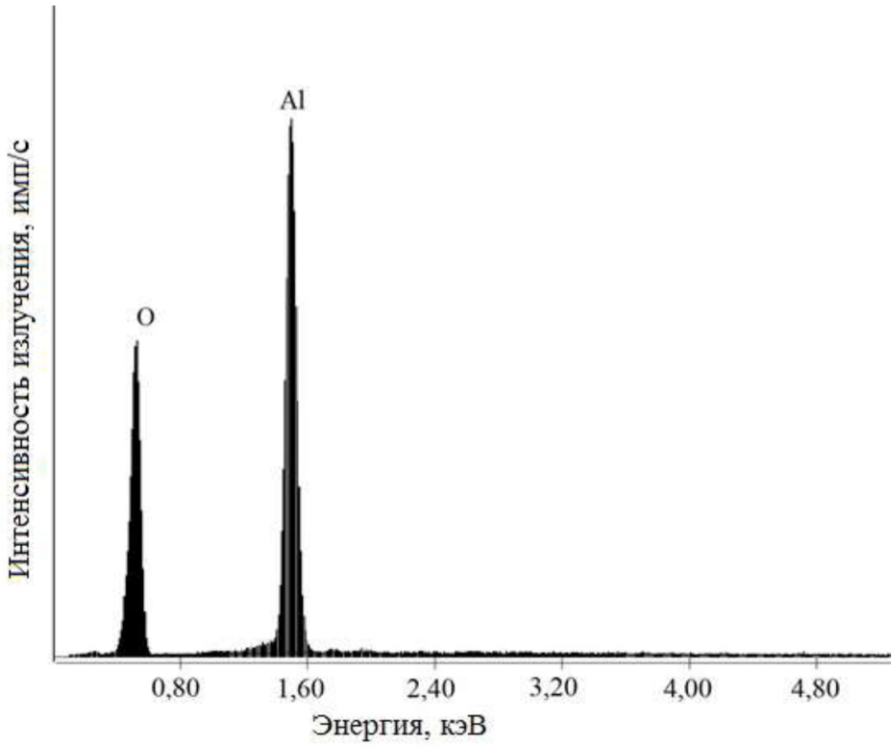


Рисунок 4.11 – Элементный состав алюмосодержащего ПМ

Элементный анализ проведен по безэталонному методу. Расчет сделан в автоматическом режиме на элементную форму. Усредненный элементный состав образца алюмосодержащего порошкового материала представлен в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Элементный состав алюмосодержащего ПМ

Элемент	Массовая доля, %	Атомарная доля, %
O	43,76	56,75
Al	56,24	43,25
Итого	100,00	100,00

Результаты рентгеноспектрального микроанализа частиц алюмосодержащего ПМ (полученного при следующих параметрах: емкость разрядных конденсаторов 65 мкФ; напряжение 100 В; частота импульсов 140 Гц), проведенного с помощью энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы EDAX, встроенного в растровый электронный микроскоп QUANTA 600 FEG, представленына рисунке 4.12 и в таблице 4.6.

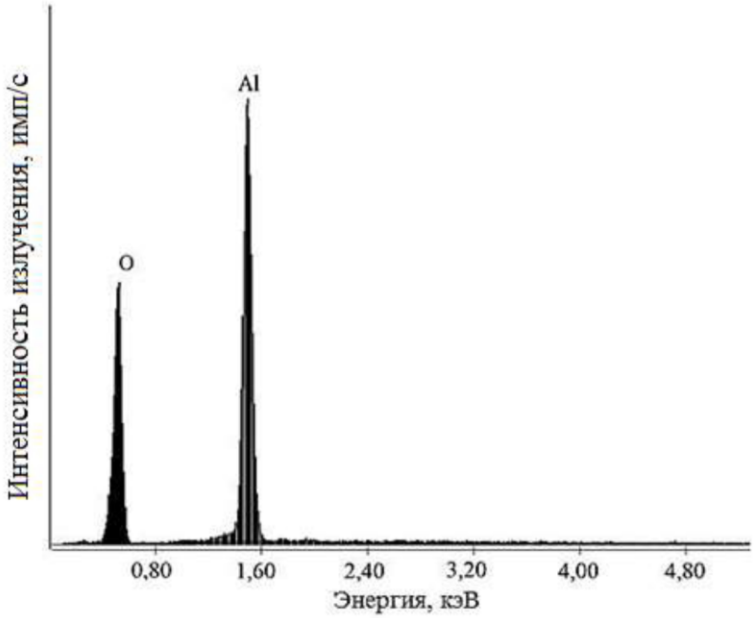


Рисунок 4.12 – Элементный состав алюмосодержащего ПМ, полученного ЭЭД в дистиллированной воде

Таблица 4.6 – Элементный состав алюмосодержащего ПМ

Элемент	Массовая доля, %	Атомарная доля, %
O	48.51	61.37
Al	51.49	38.63
Итого	100.00	100.00

По результатам представленных данных установлено, что основными элементами в ПМ, полученном способом электроэрозионного диспергирования отходов алюминия в дистиллированной воде, являются кислород и алюминий.

Таким образом, рентгеноспектральный микроанализ позволил определить элементный состав микрообъектов частиц алюмосодержащего ПМ, полученных электроэрозионным диспергированием отходов алюминия по возбуждаемому в них характеристическому рентгеновскому излучению.

4.4 Результаты исследования рентгеноструктурного анализа порошкового материала из алюминия

Свойства частиц ПМ, от которых зависит область их применения, во многом определяются их структурой. Для исследования структуры частиц полученных ПМ был проведен их рентгеноструктурный анализ на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV.

На рисунке 4.13 представлены результаты исследования фазового состава алюмосодержащего порошкового материала полученного при следующих параметрах: емкость разрядных конденсаторов 65 мкФ; напряжение 90 В; частота импульсов 50 Гц.

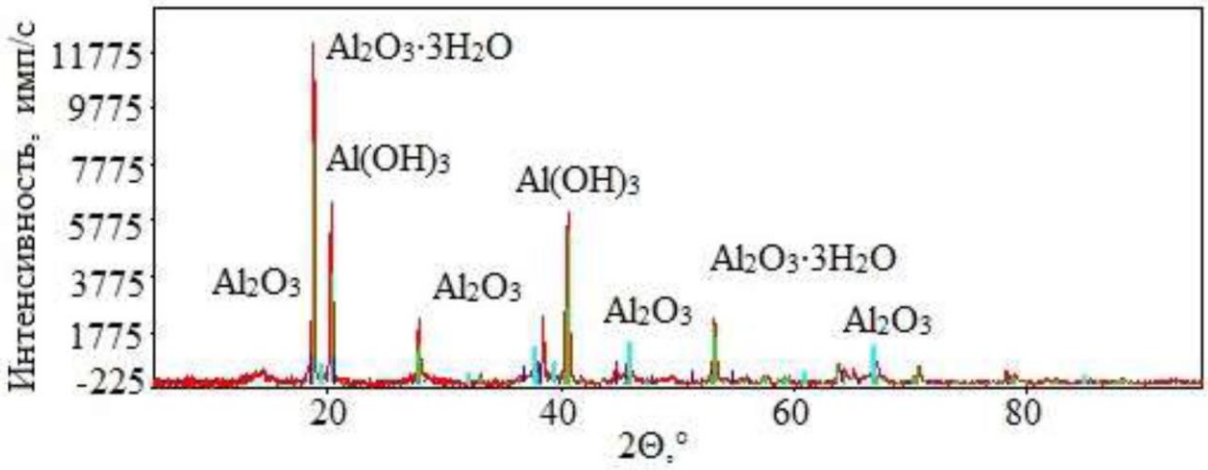


Рисунок 4.13 – Рентгенограмма алюмосодержащего ПМ

На рисунке 4.13 представлена рентгенограмма алюмосодержащего ПМ по которой можно установить, что основными фазами в алюмосодержащем ПМ являются Al_2O_3, $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ и $Al(OH)_3$.

На рисунке 4.14 представлены результаты исследования фазового состава алюмосодержащего ПМ полученного при следующих параметрах: емкость разрядных конденсаторов 65 мкФ; напряжение 100 В; частота импульсов 140 Гц.

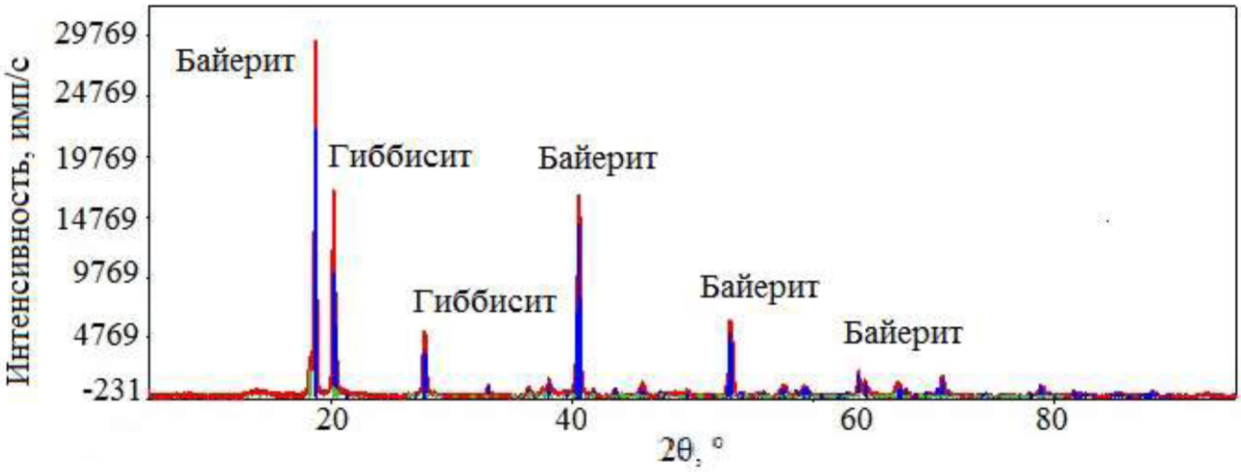


Рисунок 4.14 – Рентгенограмма алюмосодержащего ПМ

На рисунке 4.14 представлена рентгенограмма алюмосодержащего ПМ, по которой можно установить, что основными фазами в алюмосодержащем ПМ являются байерит – $Al(OH)_3$ и гиббисит – $Al(OH)_3$.

4.5 Влияние параметров восстановления дефектных головок блоков на пористость газодинамических покрытий

Результаты исследования пористости газодинамических покрытий металлографическим методом приведены на рисунках 4.15 – 4.23 в таблицах 4.7-4.9.

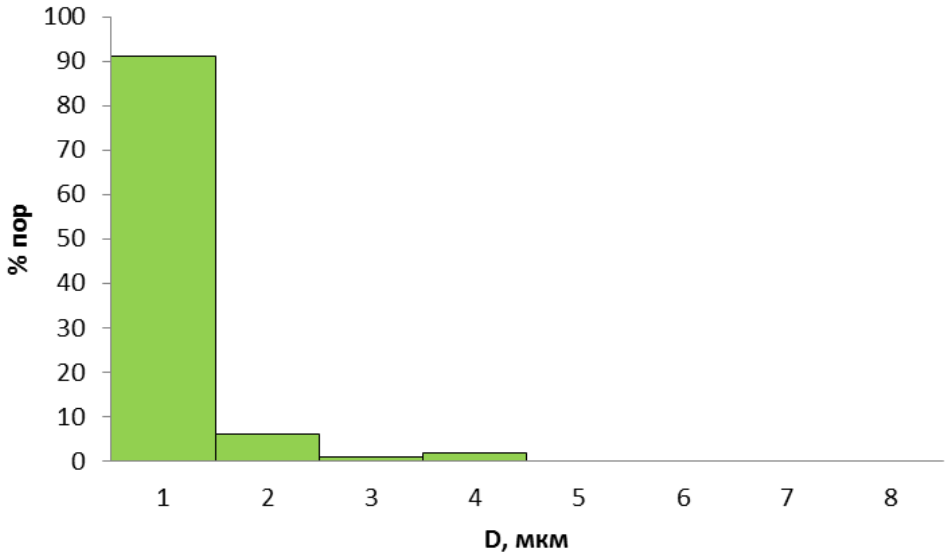


Рисунок 4.15 – Гистограмма распределения пор по размеру. Средний размер напыляемых частиц – 20 мкм.

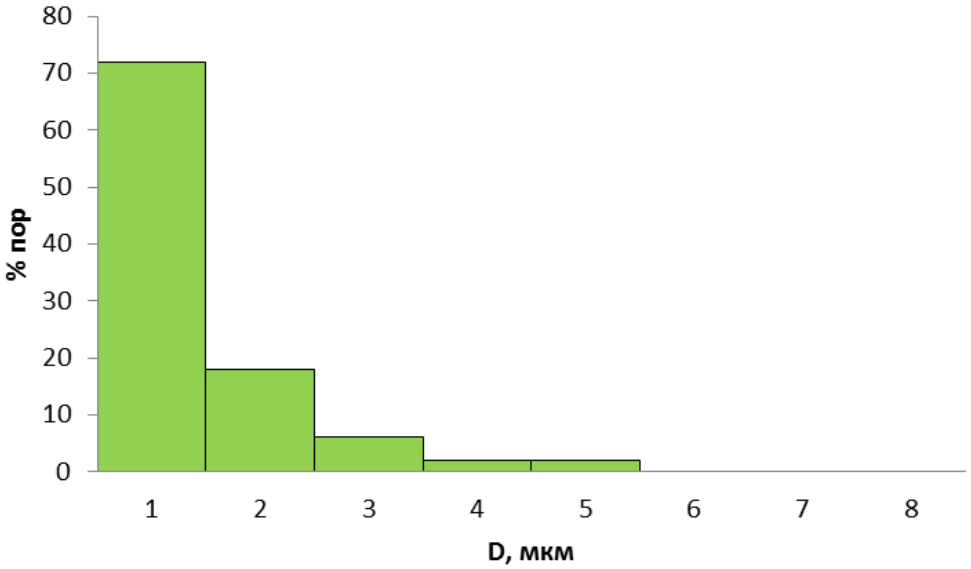


Рисунок 4.16 – Гистограмма распределения пор по размеру. Средний размер напыляемых частиц – 30 мкм.

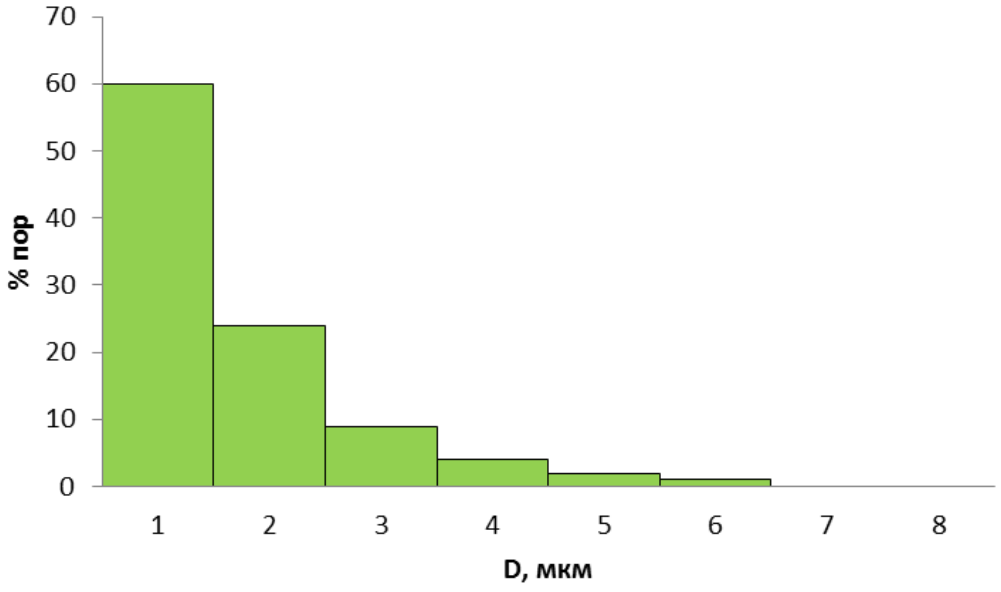


Рисунок 4.17 – Гистограмма распределения пор по размеру. Средний размер напыляемых частиц – 40 мкм.

Таблица 4.7 – Пористость газодинамического покрытия (металлографический метод)

Средний диаметр напыляемых частиц, мкм	Площадь анализа, кв, мкм	Пористость, %	D_{min}, мкм	D_{max}, мкм
20	17234,2	0,72	0,1	4,4
30	17128,4	2,19	0,1	5,3
40	17407,1	4,69	0,1	6,8

Экспериментально установлено, что пористость газодинамических покрытий при напылении частицами диаметром 20 мкм составляет 0,72 %, также показано, что 91 % пор имеют размер до 1 мкм; пористость газодинамических покрытий при напылении частицами диаметром 30 мкм составляет 2,19 %, также показано, что 72% пор имеют размер до 1 мкм; пористость газодинамических покрытий при напылении частицами диаметром 40 мкм составляет 4,69 %, также показано, что 60 % пор имеют размер до 1 мкм.

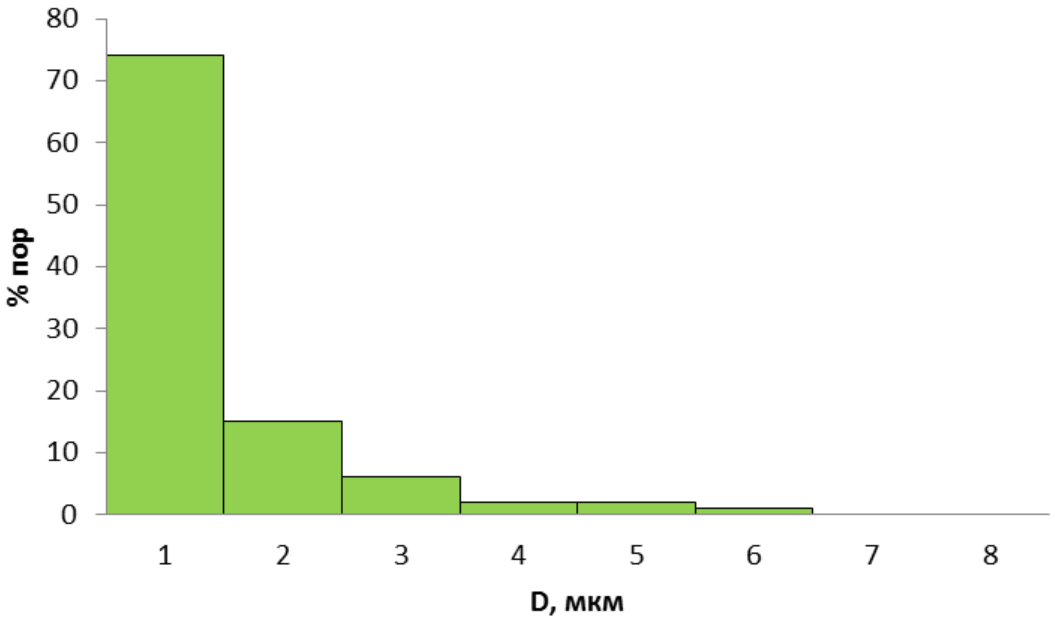


Рисунок 4.18 – Гистограмма распределения пор по размеру. Давление воздуха – 0,4 МПа

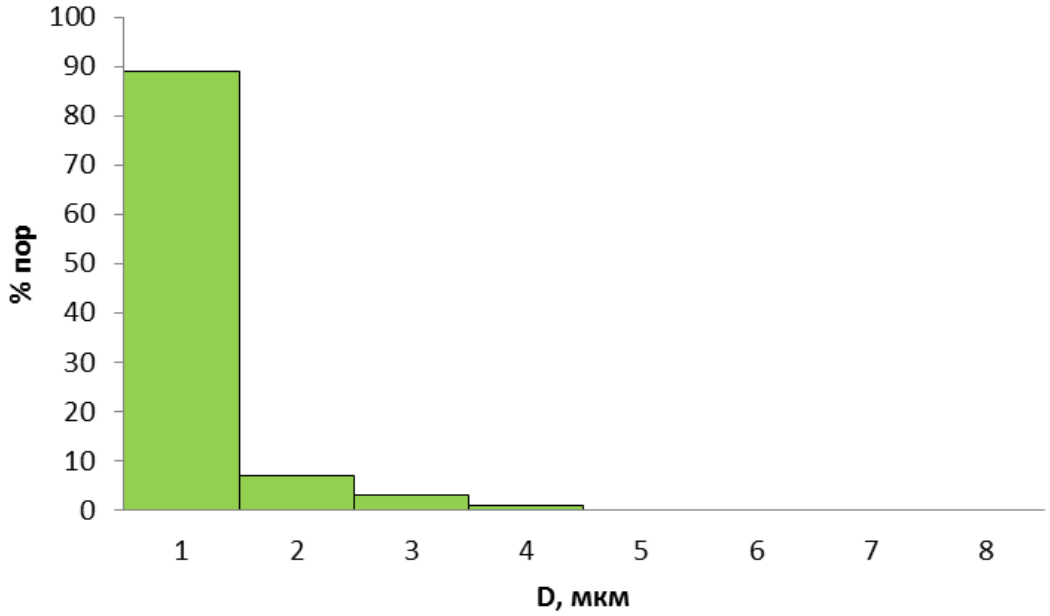


Рисунок 4.19 – Гистограмма распределения пор по размеру. Давление воздуха – 0,5 МПа

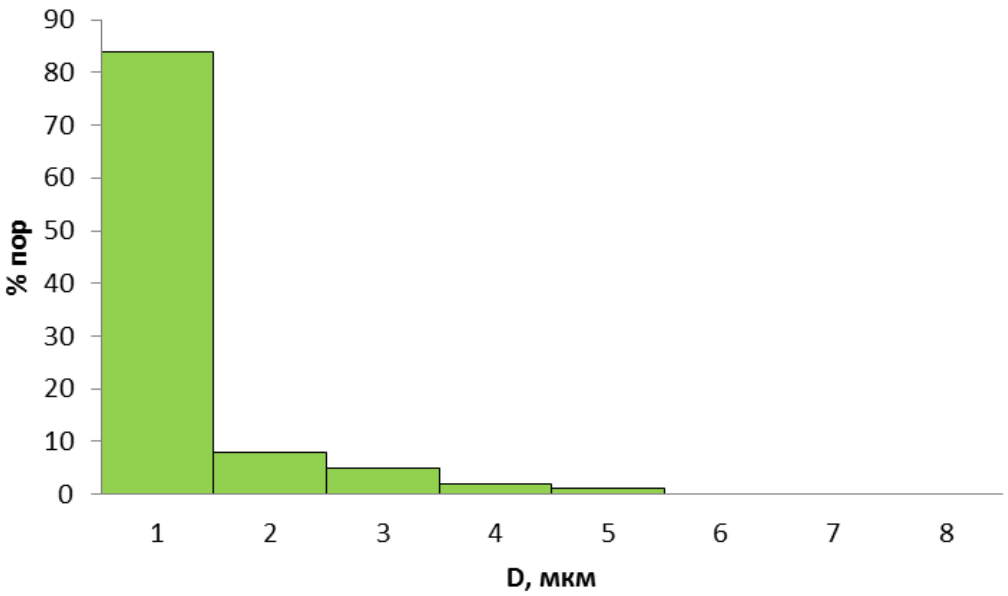


Рисунок 4.20 – Гистограмма распределения пор по размеру. Давление воздуха – 0,6 МПа

Таблица 4.8 – Пористость газодинамического покрытия (металлографический метод)

Давление воздуха, МПа	Площадь анализа, кв, мкм	Пористость, %	D_{min}, мкм	D_{max}, мкм
0,4	17924,5	4,49	0,1	6,2
0,5	17358,1	0,78	0,1	4,6
0,6	17192,6	0,91	0,1	5,5

Экспериментально установлено, что пористость газодинамических покрытий при напылении с давлением воздуха 0,4 МПа составляет 4,49 %, также показано, что 73 % пор имеют размер до 1 мкм; пористость газодинамических покрытий при напылении с давлением воздуха 0,5 МПа составляет 0,78 %, также показано, что 89 % пор имеют размер до 1 мкм; пористость газодинамических покрытий при напылении с давлением воздуха 0,6 МПа составляет 0,91 %, также показано, что 84 % пор имеют размер до 1 мкм.

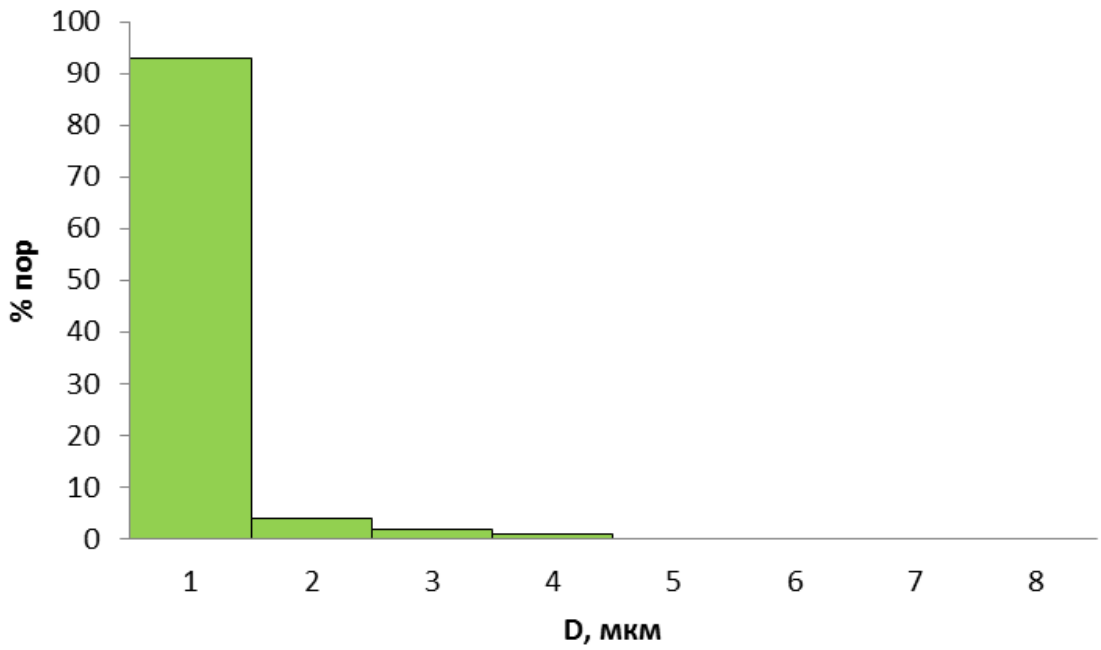


Рисунок 4.21 – Гистограмма распределения пор по размеру.

Расход порошкового материала – 0,2 г/с

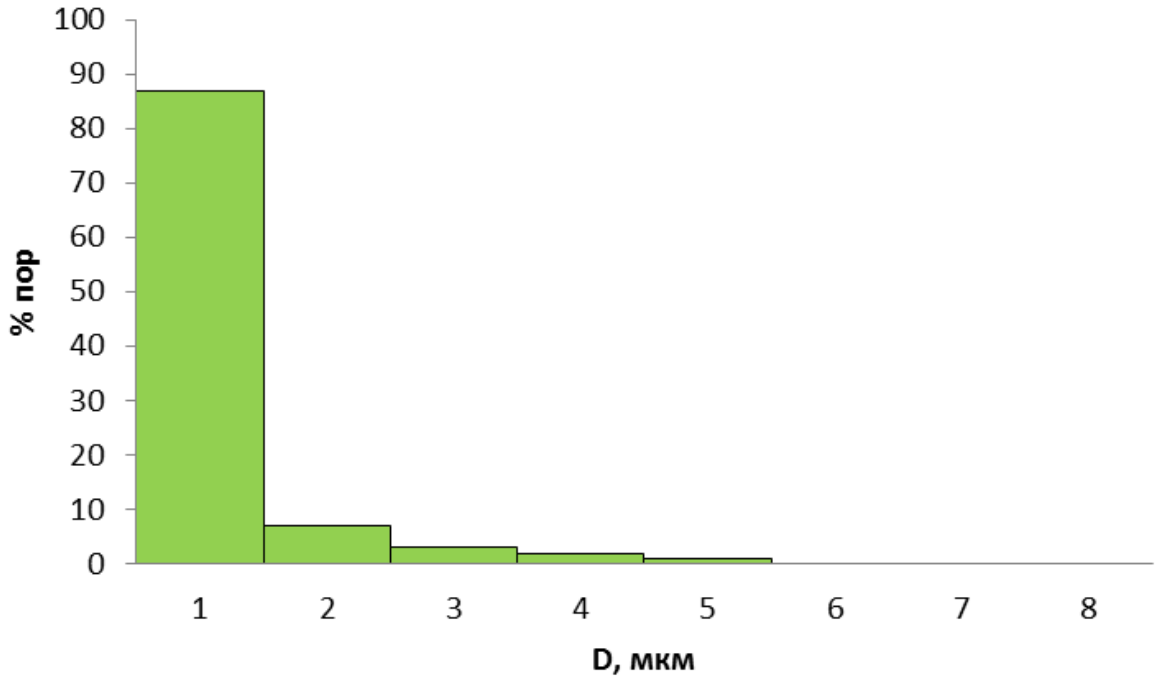


Рисунок 4.22 – Гистограмма распределения пор по размеру.

Расход порошкового материала – 0,3 г/с

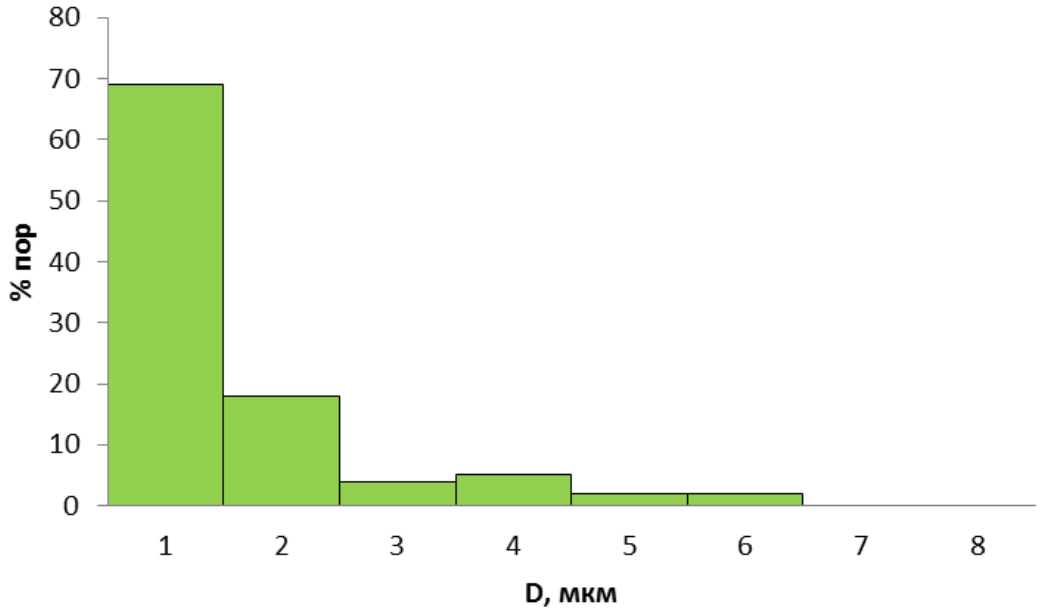


Рисунок 4.23 – Гистограмма распределения пор по размеру. Расход порошкового материала – 0,4 г/с

Таблица 4.9 – Пористость газодинамического покрытия (металлографический метод)

Расход ПМ, г/с	Площадь анализа, кв, мкм	Пористость, %	D_{min}, мкм	D_{max}, мкм
0,2	16915,9	0,69	0,1	4,3
0,3	17154,2	1,52	0,1	5,2
0,4	17432,6	4,66	0,1	6,8

Экспериментально установлено, что пористость газодинамических покрытий при напылении с расходом порошкового материала 0,2 г/с составляет 0,69 %, также показано, что 93 % пор имеют размер до 1 мкм; пористость газодинамических покрытий при напылении с расходом порошкового материала 0,3 г/с составляет 1,52 %, также показано, что 87 % пор имеют размер до 1 мкм; пористость газодинамических покрытий при напылении с расходом порошкового материала 0,4

г/с составляет 4,66 %, также показано, что 79 % пор имеют размер до 1 мкм

Затем были построены зависимости влияния среднего размера напыляемых частиц, давления воздуха и расхода порошкового материала на пористость газодинамических покрытий (рисунки 4.24-4.26).

Рисунок 4.24 – Влияние среднего диаметра напыляемых частиц на пористость газодинамических покрытий

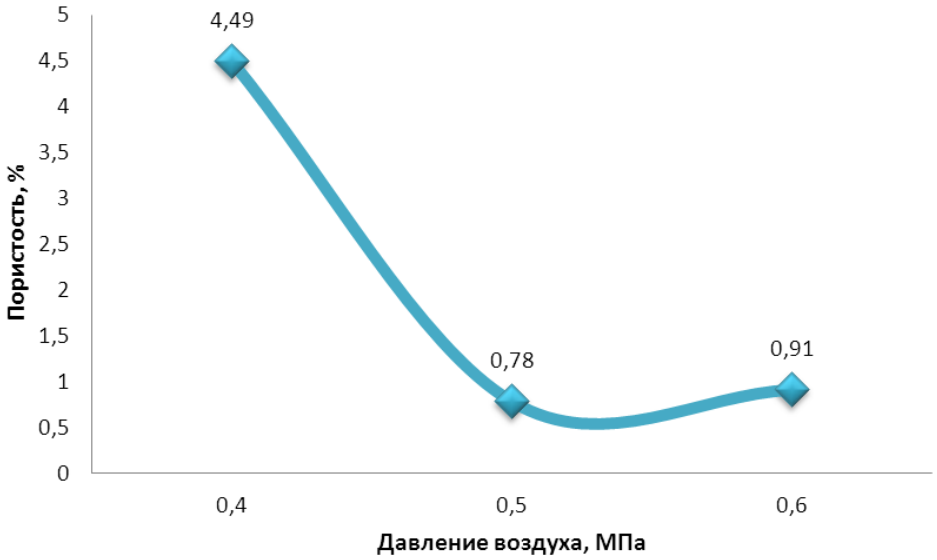


Рисунок 4.25 – Влияние давления воздуха установки ДИМЕТ на пористость газодинамических покрытий

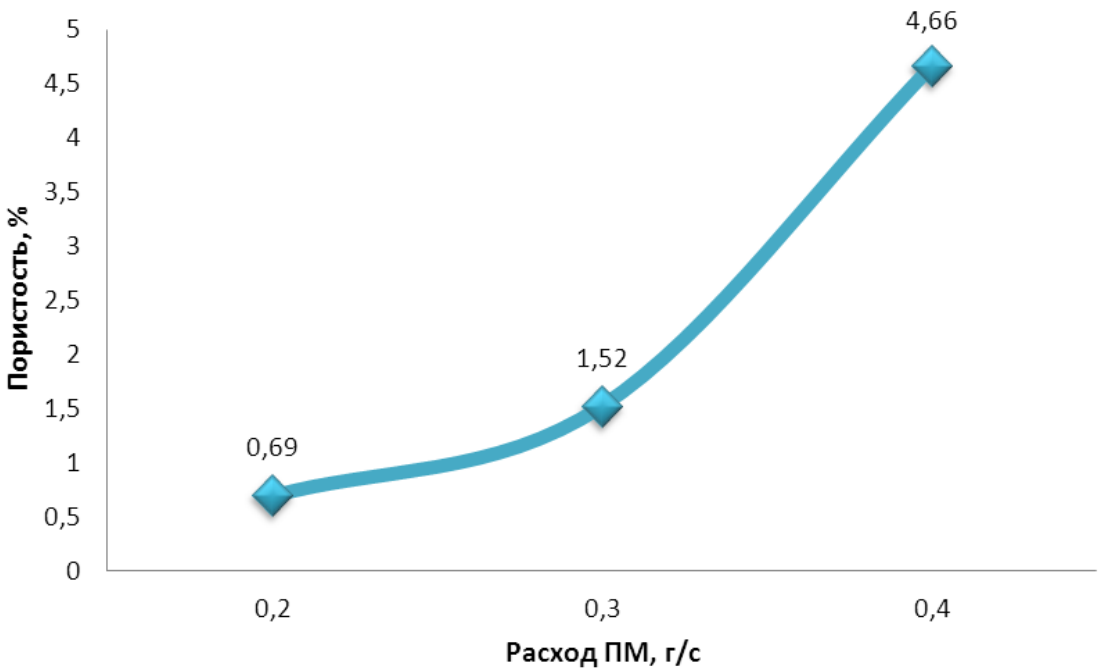


Рисунок 4.26 – Влияние расхода ПМ на пористость газодинамических покрытий

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, 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.

4.6 Постановка факторного эксперимента с целью определения оптимальных параметров восстановления дефектных головок блоков цилиндров

Постановка полного факторного эксперимента проводилась для установления оптимальных значений показателей восстановления дефектной ГБЦ установкой для газодинамического напыления ДИМЕТ-404.

Установление оптимальных значений показателей процесса газодинамического напыления и размера напыляемых алюмосодержащих частиц изучали постановкой полного факторного эксперимента по значению адгезионной прочности покрытия.

Число опытов для полного факторного эксперимента на двух уровнях определяется по формуле:

$$N = 2^k \tag{4.1}$$

где к – количество факторов.

При постановке экспериментов использовали 3 фактора, следовательно, число опытов для полного факторного эксперимента составит 8.

Сначала необходимо посчитать координаты центра плана z_1^0 и интервал варьирования Δz_i.

$$z_i^0 = \frac{z_i^{max} + z_i^{min}}{2} \tag{4.2}$$

$$\Delta z_i = \frac{z_i^{max} - z_i^{min}}{2} \tag{4.3}$$

где z_i^{max} и z_i^{min} – соответствующее максимальное и минимальное значение фактора.

$z_1^0 = 0{,}4$; $\Delta z_1 = 0{,}1$; $z_2^0 = 0{,}3$; $\Delta z_2 = 0{,}1$; $z_3^0 = 20$; $\Delta z_3 = 10$;

В таблице 4.10 представлены интервалы и уровни варьирования факторов

Таблица 4.10 – Интервалы и уровни 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

Для построения матрицы планирования эксперимента (таблица 4.11) необходимо перейти к кодированным значениям:

$$x_i = \frac{z_1 - z_i^o}{\Delta z_i} \tag{4.4}$$

В результате x_i принимают значения +1 и –1, соответствующие максимальному и минимальному значению фактора.

Дополнительно вводим фиктивную переменную x_0 = +1, которая ставится перед свободным членом b_0 в уравнении регрессии.

Таблица 4.11 – Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Порядок реализации опыта	X_0	X_1 (P, МПа)	X_2 (Q, г/с)	X_3 (D, мкм)	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Y (Адгезия (Lc, МПа)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	7	+	+	+	+	+	+	+	+	81,4
2	2	+	-	+	+	-	-	+	-	77,6
3	8	+	+	-	+	-	+	-	-	79,2

Продолжение таблицы 4.11

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	3	+	-	-	+	+	-	-	+	75,7
5	1	+	+	+	-	+	-	-	-	74,4
6	4	+	-	+	-	-	+	-	+	73,7
7	5	+	+	-	-	-	-	+	+	72,9
8	6	+	-	-	-	+	+	+	-	72,4

По результатам эксперимента вычисляем коэффициенты модели. Свободный член b_0 определяем по формуле:

$$b_0 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} y_j \qquad (4.5)$$

Коэффициенты регрессии, которые показывают линейные эффекты, вычисляем по формуле:

$$b_i = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} x_{ij} y_i \ . \qquad (4.6)$$

Коэффициенты регрессии, которые показывают эффекты взаимосвязи, вычисляем по формуле:

$$b_{ij} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} x_{ij} x_{ij} y_i \qquad (4.7)$$

В результате расчетов, получаем: b_0= 75,9; b_1 = 8,5; b_2 = 6,3; b_3 = 20,5.

Рассчитаем коэффициенты парного взаимодействия:

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

Уравнение регрессии в общем виде имеет вид:

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

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

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

В нашем случае, используя коэффициенты, посчитанные по формулам 2.20-2.22 получили модель в виде полинома первой степени:

$$Y = 75{,}9 + 8{,}5X_1 + 6{,}3X_2 + 20{,}5X_3 + 0{,}5 \cdot X_1 X_2 + 6{,}1 \cdot X_1 X_3 + 1{,}3 \cdot X_2 X_3 + 0{,}1 \cdot X_1 \cdot X_2 X_3$$

Исходя из значений модели параметр оптимизации увеличивает свое значение с увеличением показателей параметров X_1, X_2 и X_3. Максимальное воздействие проявляет фактор X_3, – средний размер частиц (мкм).

С целью установления дисперсии параметра оптимизации были реализованы 3 эксперимента для выявления факторов на основных уровнях. Экспериментальные показатели параметра оптимизации y_u, среднее значение ý, отличие числовых показателей параметра оптимизации от его среднего значения (y_u–ý) и квадраты их отклонений показаны в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Вспомогательная таблица для расчета

Номер опыта	y_u	ý	(y_u– ý)	(y_u – ý)^2
1	76,4	$\sum_{n=1}^{3}(y_u - ý)^2 \ / \ 3 \ = 76$	+0,2	0,04
2	76,2		0	0
3	75,4		-0,4	0,64
Σ(y_u – ý)^2				0,68

Дисперсия параметра оптимизации:

$$S_{y^2} = \sum_{n=1}^{3}(y_u - ý)^2 \ / \ 2 \ . \qquad (4.8)$$

$$S_{y^2} = 0{,}34$$

Уровень значимости числовых значений коэффициентов в уравнении регрессии проверяли по отдельности по критерию Стьюдента:

$$t_j = |b_j|/Sb_j \qquad (4.9)$$

где b_j – j-й коэффициент уравнения регрессии;

Sb_j – среднее квадратичное отклонение j-го коэффициента (0,2).

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

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 имеет вид:

$$Y = 75,9 + 8,5X_1 + 6,3X_2 + 20,5X_3 + 6,1 \cdot X_1 X_3 + 1,3 \cdot X_2 X_3 \qquad (4.10)$$

Средняя квадратичная ошибка в определении коэффициентов регрессии:

$$S\{b_i\} = (S^2y / N)^{1/2}. \qquad (4.11)$$

$$S\{b_i\} = (0,34 / 8)^{1/2} = 0,20.$$

Доверительный интервал коэффициентов регрессии при числе степеней свободы f=2:

$$\Delta b = \pm t \cdot S\{b_i\}. \qquad (4.12)$$

$$\Delta b = \pm 4,3 \cdot 0,20 = \pm 0,86.$$

Проверку адекватности модели производили по F-критерию Фишера. Для

вычисления дисперсии адекватности составили вспомогательную таблицу 4.13.

Таблица 4.13 – Вспомогательная таблица для расчета $S_{ад}^2$

Номер опыта	y_j	$\hat{y}_j$	$y_j - \hat{y}_j$	$(y_j - \hat{y}_j)^2$
1	81,4	81,28	0,12	0,01
2	77,6	77,29	0,31	0,01
3	79,2	80,11	-0,94	0,81
4	75,7	74,81	0,89	0,78
5	74,4	75,29	-0,83	0,68
6	73,7	74,21	-0,51	0,26
7	72,9	72,63	0,27	0,07
8	72,4	72,21	-0,19	0,04
$\sum(y_j - \hat{y}_j)^2$				2,66

$$S_{ад}^2 = (y_j - \hat{y}_j)^2 / (N - (k+1)). \quad (4.13)$$

$$S_{ад}^2 = 2,66 / (8 - (3+1)) = 0,66.$$

$$F_р = S_{ад}^2 / S_y^2 = 0,66 / 0,34 = 1,9.$$

Табличное значение $F_т$ – критерия при 5 % уровне значимости и числах степеней свободы для числителя 4 и для знаменателя 2 равно 19,3. Fр<Fт. Следовательно, модель адекватна.

Полученное уравнение было использовано для крутого восхождения по поверхности отклика. Крутое восхождение начинали из нулевой точки (основные уровни): X_1= 0,4 МПа, X_2= 0,3, г/X_3= 20 мкм с (таблица 4.14). Шаг движения для фактора X_1 приняли равным 0,1МПа. Вычислили шаг движения для X_2= 0,1, фактор X_3= 10.

По окончании эксперимента на новых уровнях было получено максимальное значение параметра оптимизации Y, которое составило 81,4 МПа.

Таблица 4.14 – Расчет крутого восхождения

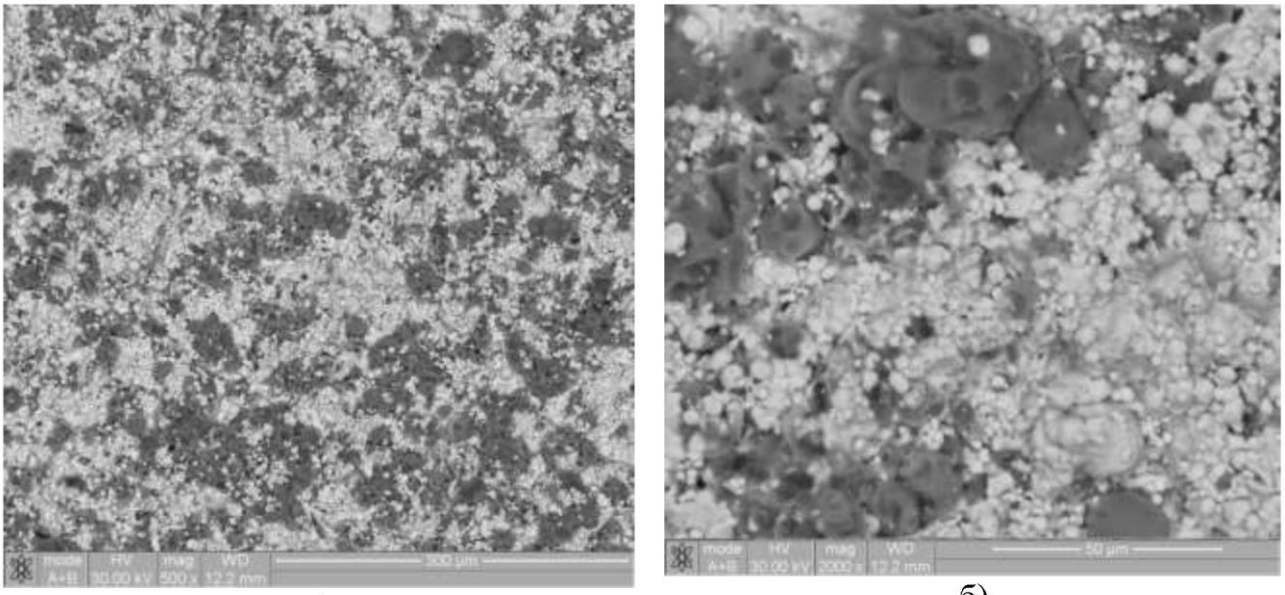
Наименование	X_1(давление воздуха (P), МПа	X_2(расход ПМ (Q), г/с	X_3 (средний размер частиц (D), мкм	Y (МПа)
1	2	3	4	5
Основной уровень	0,4	0,3	20	–
Коэффициент b_i	8,5	6,3	20,5	–
Интервал варьирования ξ_i	0,1	0,1	10	–
$b_i \cdot \xi_i$	0,85	0,63	205	–
Шаг Δ_i	0,1	0,1	5	–
Округленный шаг	0,1	0,1	5	–
Мысленный опыт	0,3	0,1	10	–
Мысленный опыт	0,4	0,2	15	–
Реализованный опыт 9	0,5	0,2	20	81,4
Мысленный опыт	0,6	0,3	25	–
Реализованный опыт 10	0,7	0,4	30	75,4
Реализованный опыт 11	0,8	0,5	35	63,2,1

Таким образом, учитывая данные экспериментальных исследований пористости покрытий, полученные в пункте 4.5 и расчеты полного факторного эксперимента, можно сделать вывод, что оптимальными параметрами для процесса восстановления дефектной ГБЦ способом газодинамического напыления с применением электроэрозионных ПМ являются: средний размер напыляемых металлических частиц 20 мкм, давление воздуха 0,5 МПа, температурный режим №3, расход порошкового материала 0,2 г/с.

4.7 Результаты исследования микроструктуры и рентгеноспектрального микроанализа газодинамических покрытий

С помощью энерго-дисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы EDAX, встроенного в растровый электронный микроскоп «QUANTA 200 3D», были получены спектры характеристического рентгеновского излучения в различных точках на поверхности образца и по поперечному шлифу.

Результаты микроскопии и микроанализа покрытия со стандартным ПМ приведены на рисунке 4.27, 4.28 и в таблице 4.15.



а) б)

Рисунок 4.27 – Микроструктура покрытия со стандартным ПМ

а) при разрешающей способности 500; б) при разрешающей способности 2000

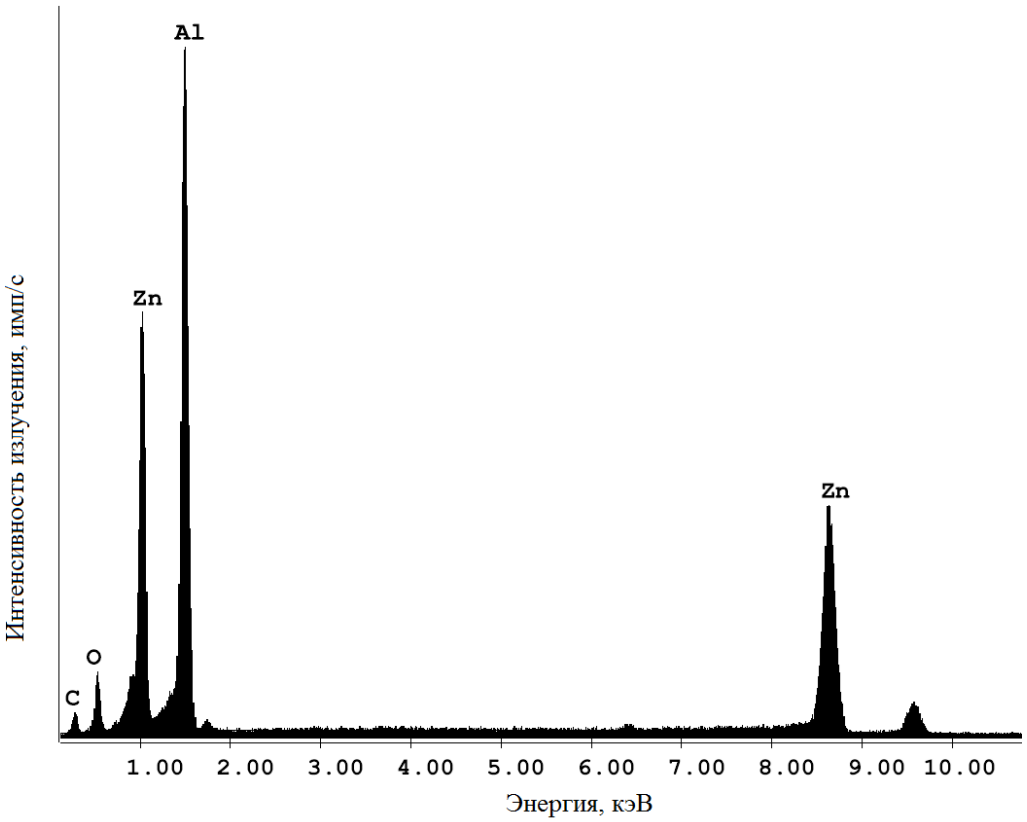


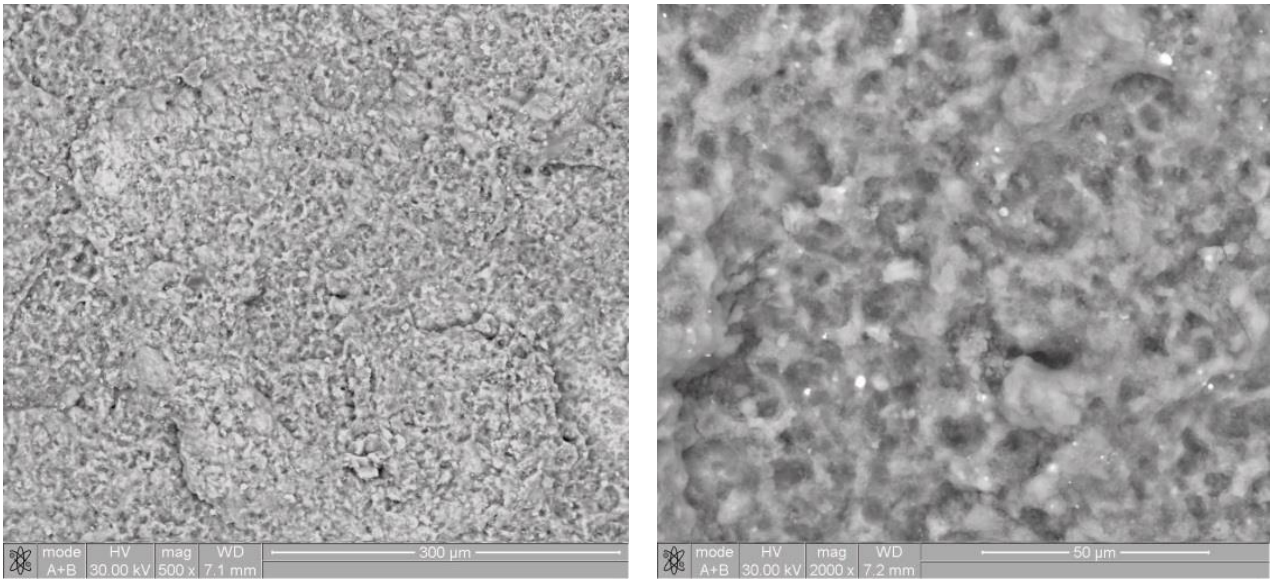
Рисунок 4.28 ¬РСМА покрытия со стандартным ПМ

Таблица 4.15 – РСМА покрытия со стандартным ПМ

Элемент	Массовая доля, %	Атомарная доля, %
C	15,26	33,24
O	7,58	12,39
Al	41,28	40,01
Zn	35,88	14,36
Итого	100	100

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

Результаты микроскопии и микроанализа покрытия с экспериментальным ПМ приведены на рисунке 4.29, 4.30 и в таблице 4.16.



а) б)

Рисунок 4.29 – Микроструктура покрытия с экспериментальным ПМ

а) при разрешающей способности 500; б) при разрешающей способности 2000

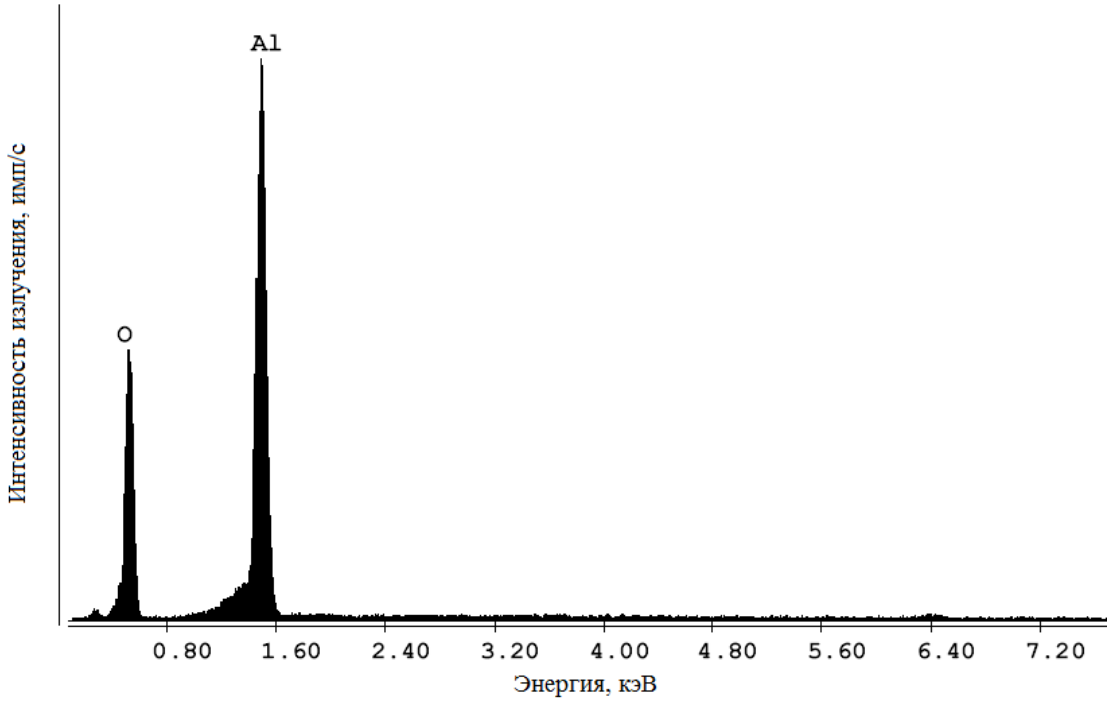


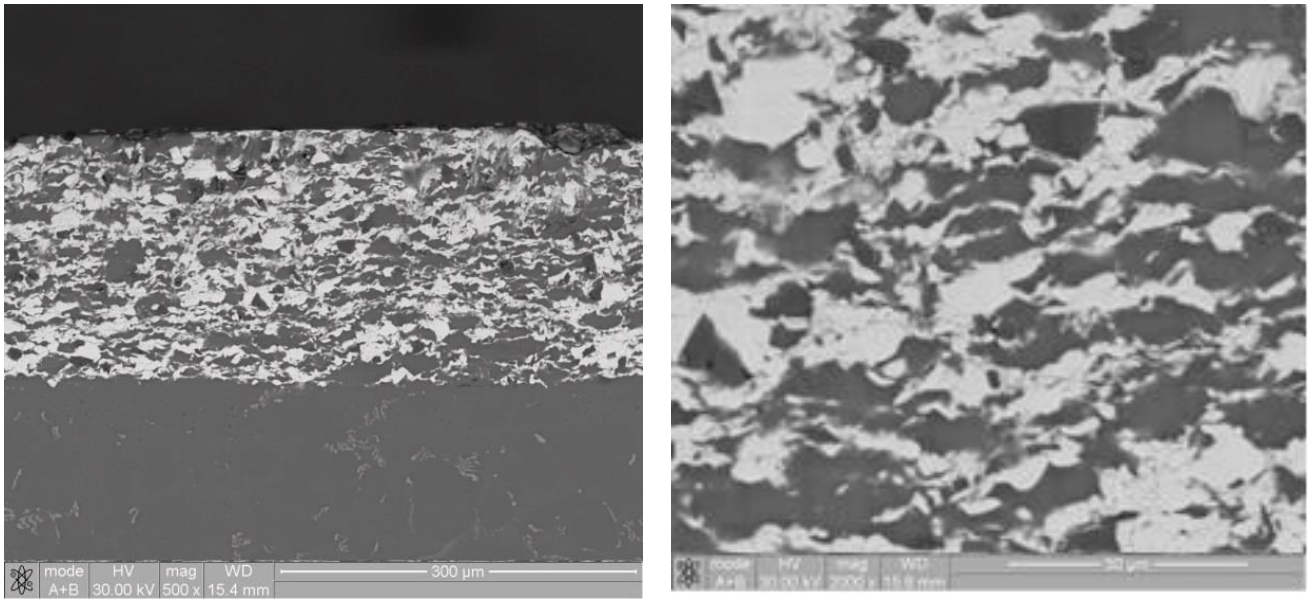
Рисунок 4.30 ¬РСМА покрытия с экспериментальным ПМ

Таблица 4.16 – РСМА покрытия с экспериментальным ПМ

Элемент	Массовая доля, %	Атомарная доля, %
O	53,39	65,89
Al	46,61	34,11
Итого	100	100

Экспериментально установлено, что основными элементами покрытий образца, полученного с использованием алюмосодержащего электроэрозионного ПМ, являются Al и O.

Результаты исследования микроструктуры и элементного состава поперечного шлифа газодинамических покрытий со стандартным ПМ, полученные на энерго-дисперсионном анализаторе рентгеновского излучения фирмы EDAX, встроенного в растровый электронный микроскоп «QUANTA 200 3D» представлены ниже на рисунках 4.31,4.32 и в таблице 4.17.



а) б)

Рисунок 4.31– Микроструктура покрытий со стандартным ПМ

(BSE – режим обратно-рассеянных электронов):

а) при разрешающей способности 500; б) при разрешающей способности 2000

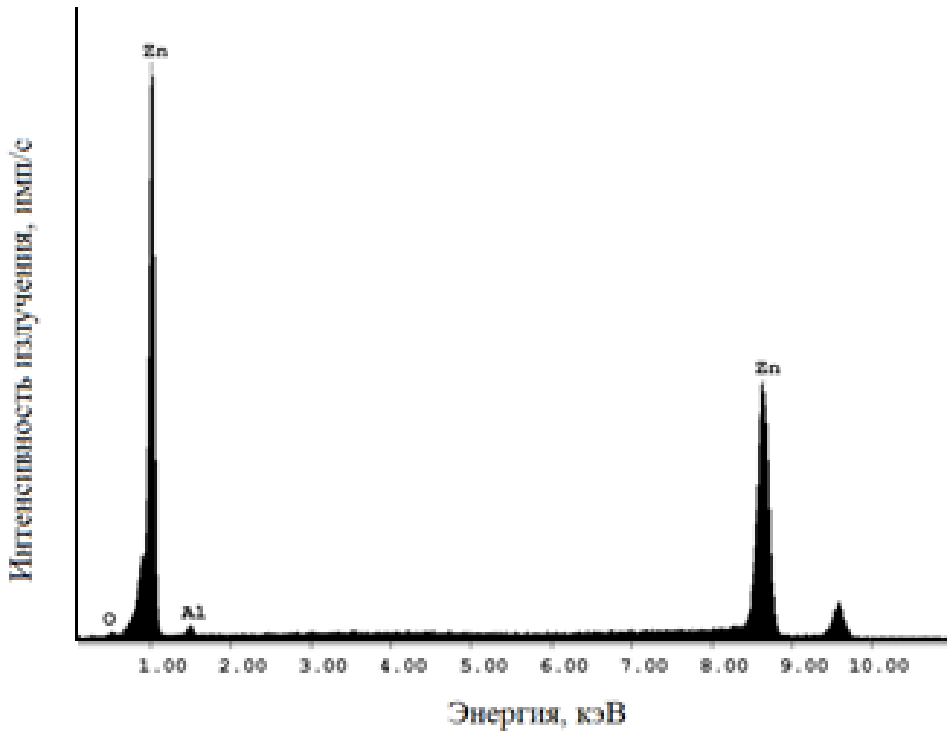


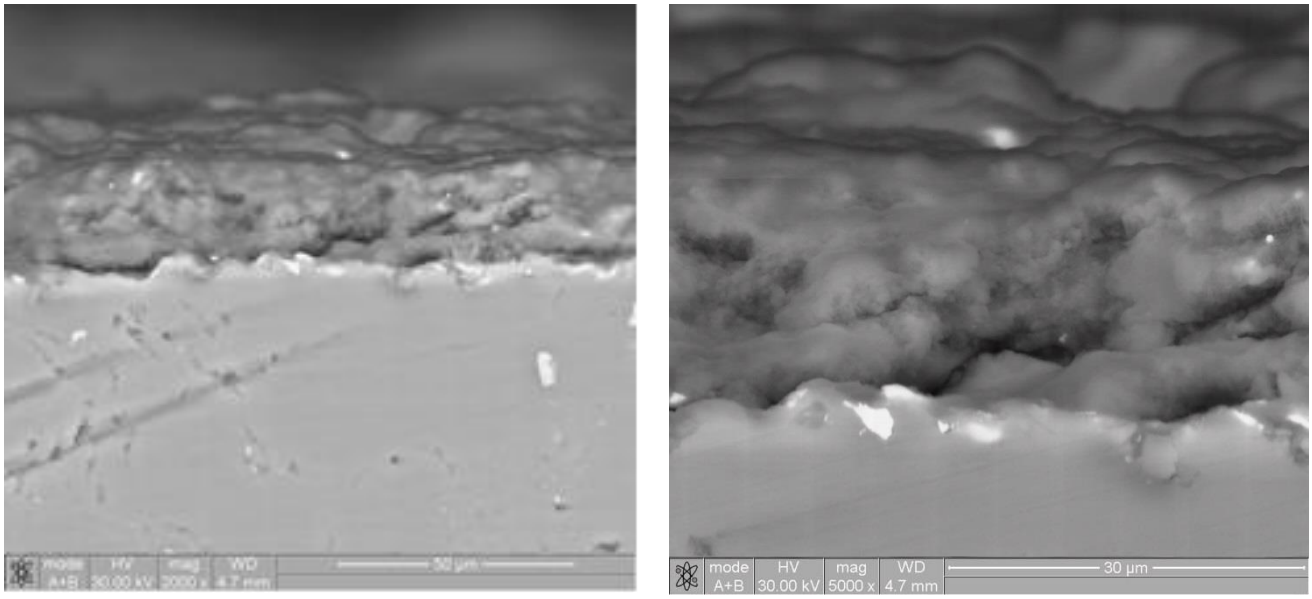
Рисунок 4.32 ¬РСМА образца со стандартным покрытием

Таблица 4.17 – РСМА образца со стандартным покрытием

Элемент	Массовая доля, %	Атомарная доля, %
O	1,02	3,91
Al	2,65	6,01
Zn	96,32	90,08
Итого	100	100

Установлено что основными элементами газодинамических покрытий образца со стандартным покрытием являются Zn, Al, и O.

Результаты исследования микроструктуры и элементного состава поперечного шлифа газодинамических покрытий с экспериментальным ПМ, полученные на энерго-дисперсионном анализаторе рентгеновского излучения фирмы EDAX, встроенного в растровый электронный микроскоп «QUANTA 200 3D» представлены ниже на рисунках 4.33,4.34 и в таблице 4.18.



а) б)

Рисунок 4.33 – Микроструктура покрытий с экспериментальным ПМ (BSE – режим обратно-рассеянных электронов):

а) при разрешающей способности 2000; б) при разрешающей способности 5000

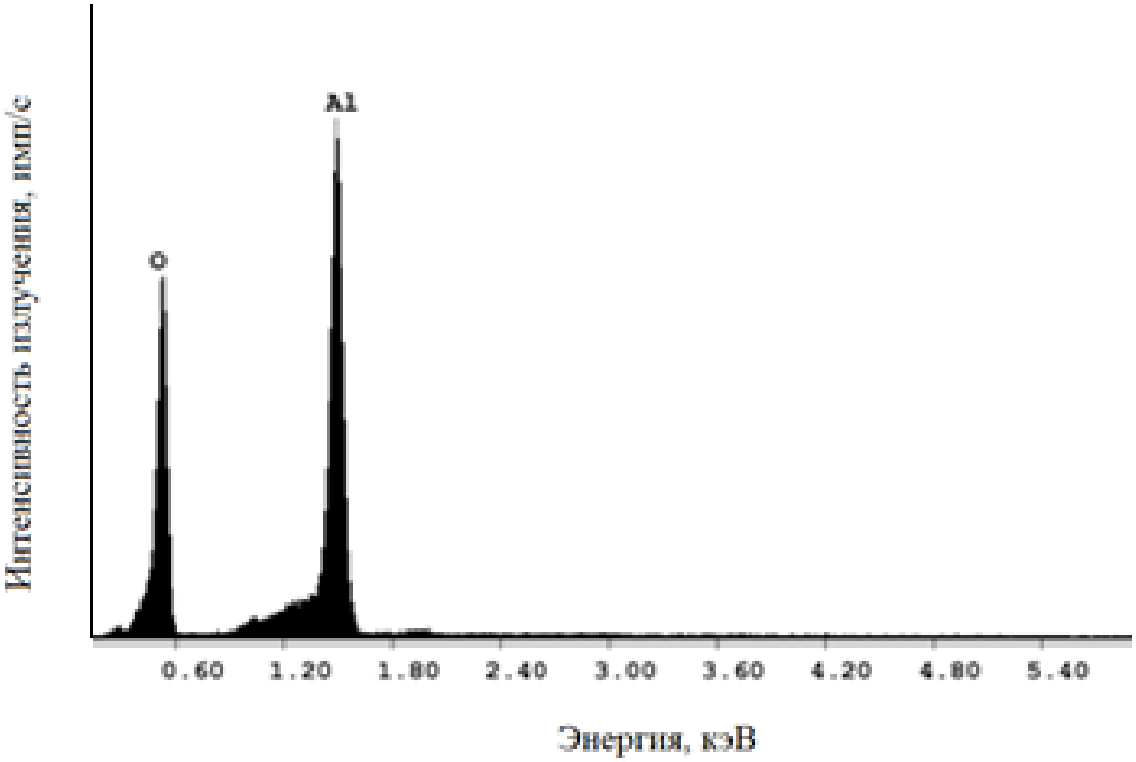


Рисунок 4.34¬РСМА образца с экспериментальным покрытием

Таблица 4.18 – РСМА образца с экспериментальным покрытием

Элемент	Массовая доля, %	Атомарная доля, %
O	59,78	71,48
Al	40,22	28,52
Итого	100	100

Установлено что основными элементами газодинамических покрытий образца с экспериментальным покрытием являются Al и O.

4.8 Результаты исследования рентгеноструктурного микроанализа газодинамических покрытий

Результаты исследований представлены ниже на рисунках 4.35, 4.36 и в таблицах 4.19, 4.20.

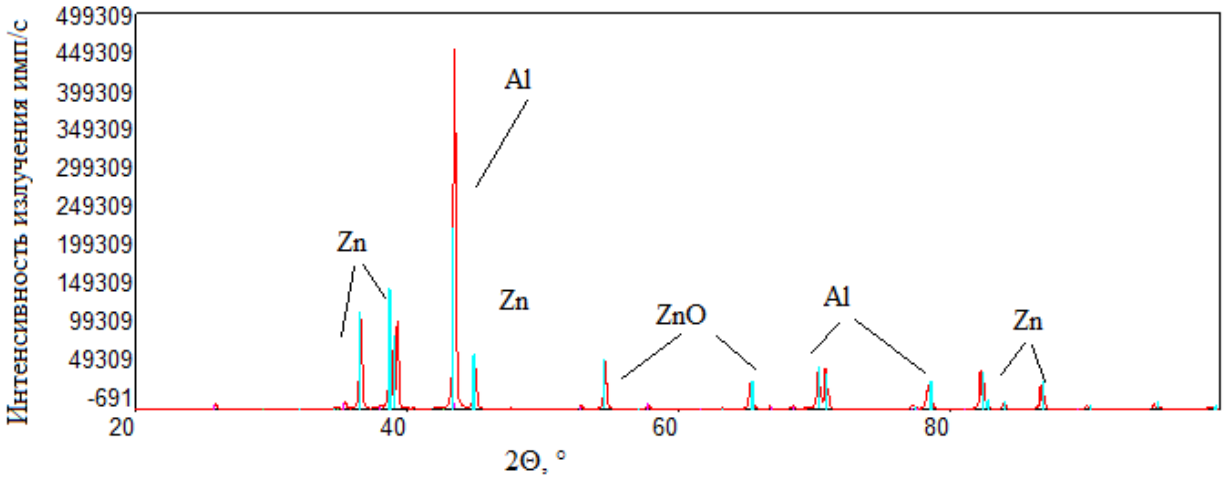


Рисунок 4.35 Фазовый состав покрытия с использованием стандартного ПМ

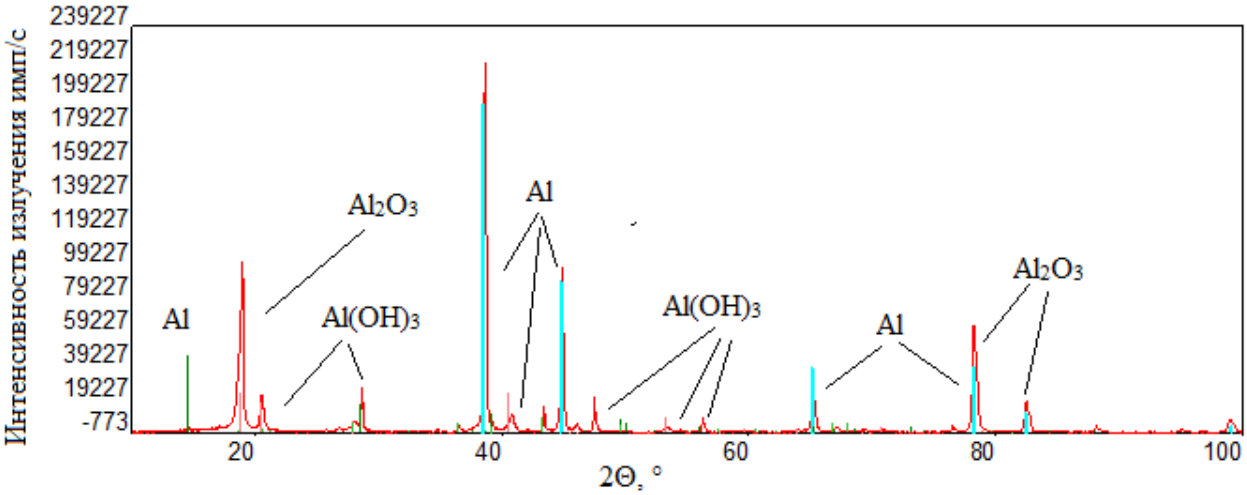


Рисунок 4.36 Фазовый состав покрытия с использованием экспериментального ПМ

Таблица 4.19 – Параметры решеток газодинамического покрытия со стандартным ПМ

Наименование	Химическая формула	Параметры кристаллической решетки, нм	Тип кристаллической решетки

Алюминий	Al	a = 4.03127;
		b = 4.03127;
		c = 4.03127.
			Кубическая кристаллическая решётка

Цинк	Zn	a = 2.656542;
		b = 2.656542;
		c = 4.921967.
			Гексагональная кристаллическая решётка

Оксид цинка	ZnO	a = 3.222706;
		b = 3.222706;
		c = 5.185404.
			Гексагональная кристаллическая решётка

Корунд	Al_2O_3	a = 4.832389;
		b = 8.339462;
		c = 8.339462.
			Орторомбическая кристаллическая решётка

Таблица 4.20 – Параметры решеток газодинамического покрытия с экспериментальным ПМ

Наименование	Модификация	Химическая формула	Параметры кристаллической решетки, нм	Тип кристаллической решетки

Алюминий		Al	a = 4.049255;
			b = 4.049255;
			c = 4.049255.
				Кубическая кристаллическая решётка

Гидроксид алюминия (III)	Байерит	$Al(OH)_3$	a = 5.056874;
			b = 8.662219;
			c = 4.708227.
				моноклинная кристаллическая решётка

Корунд		Al_2O_3	a = 4.738979;
			b = 4.738979;
			c = 12.93776.
				Тригональная кристаллическая решётка

4.9 Результаты исследования твердости и адгезионной прочности газодинамических покрытий

Результаты испытания твердости образцов по поверхности представленые в таблице 4.21 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).

Таблица 4.21 – Твердость образцов по Бринеллю

Образец	Твёрдость, HB
Образец со стандартным ПМ	94,3
Образец с экспериментальным ПМ	107,2

Испытания адгезионной/когезионной прочности, стойкости к царапанью

проводилина скретч-тестер Revetest (CSM Instruments). Для определения характера разрушения при высокой нагрузке было проведено исследование микроструктуры поверхности образцов после адгезионных испытаний с помощьюэлектронно-ионного сканирующего микроскопа Quanta 200 3D. На рисунках 4.37-4.46 и в таблице 4.22 – 4.28 приведены результаты адгезионных испытаний образцов.

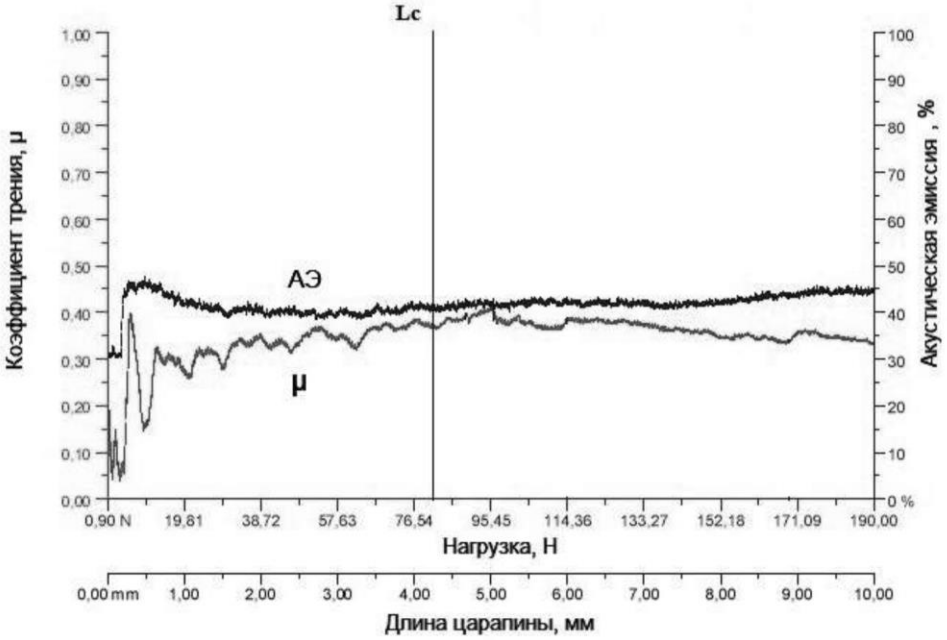
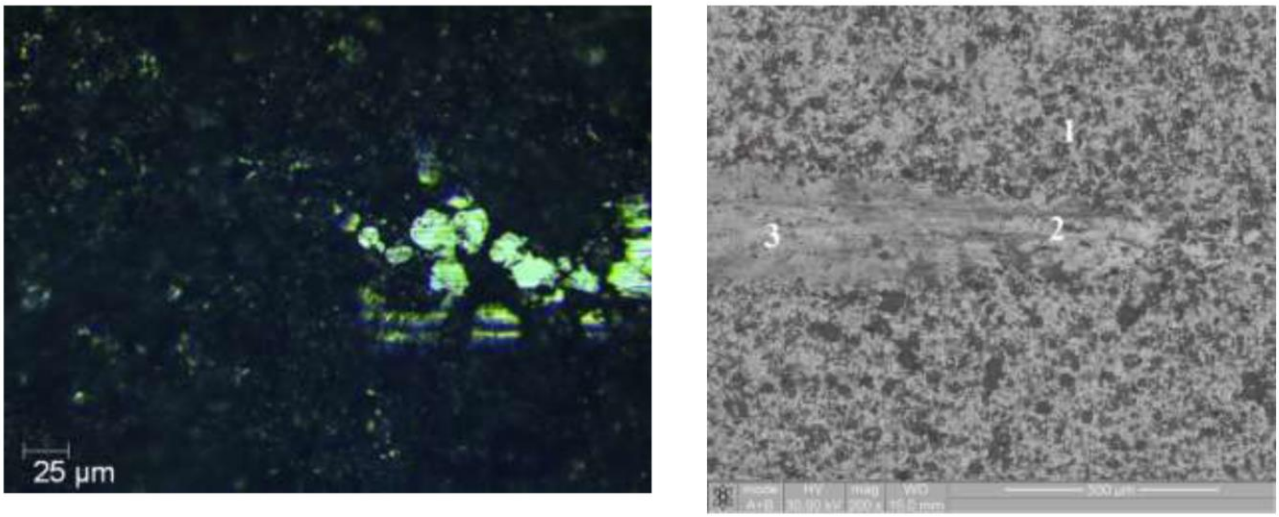


Рисунок 4.37 – Зависимости изменения акустической эмиссии и коэффициента трения от приложенной нагрузки образца с экспериментальным ПМ



а) б)

Рисунок 4.38 – изображение участков царапины образца с экспериментальным ПМ: (а) оптическое (х800) и б) растровое х200.

Таблица 4.22 – РСМА царапины покрытия с экспериментальным ПМ в точке 1

Элемент	Массовая доля, %	Атомарная доля, %
O	51,08	64,08
Al	48,92	35,92
Итого	100	100

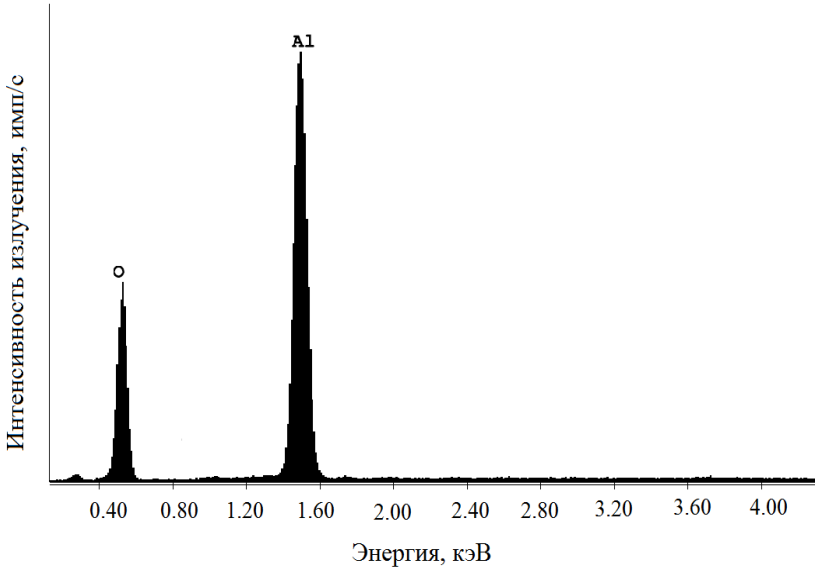


Рисунок 4.40 ¬РСМА царапины покрытия с экспериментальным ПМ в точке 2

Таблица 4.23 – РСМА царапины покрытия с экспериментальным ПМ в точке 2

Элемент	Массовая доля, %	Атомарная доля, %
O	49,43	62,51
Al	50,57	37,49
Итого	100	100

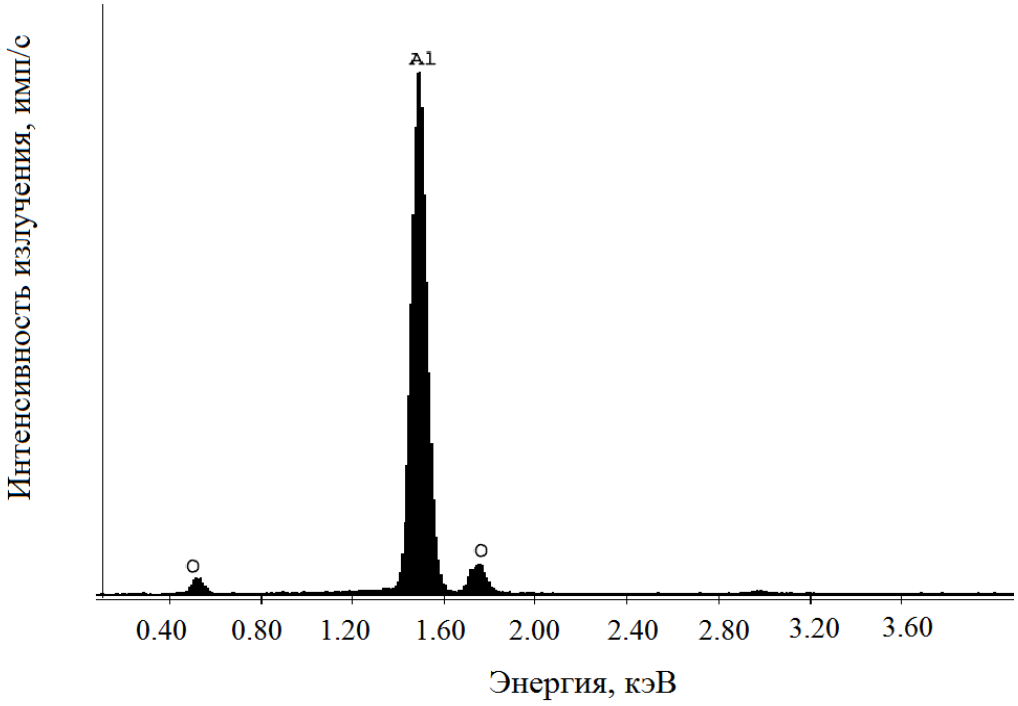


Рисунок 4.41 ¬РСМА царапины покрытия с экспериментальным ПМ в точке 3

Таблица 4.24 – РСМА царапины покрытия с экспериментальным ПМ в точке 3

Элемент	Массовая доля, %	Атомарная доля, %
O	28,22	37,49
Al	71,78	66,34
Итого	100	100

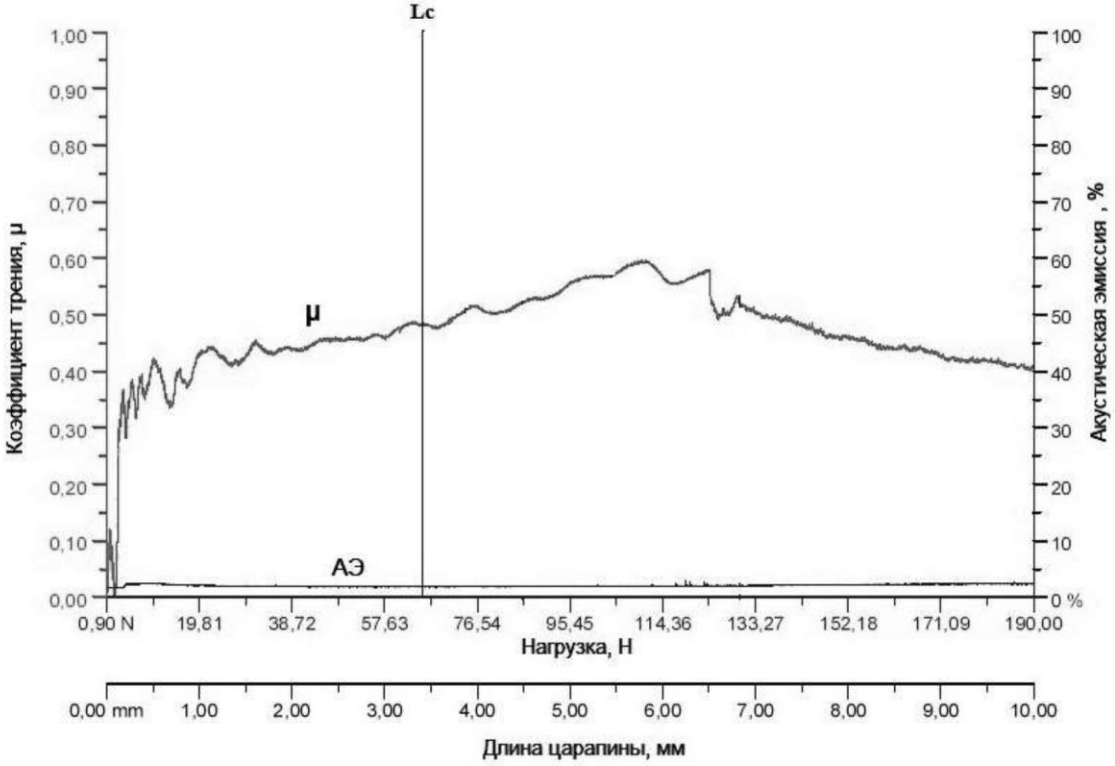
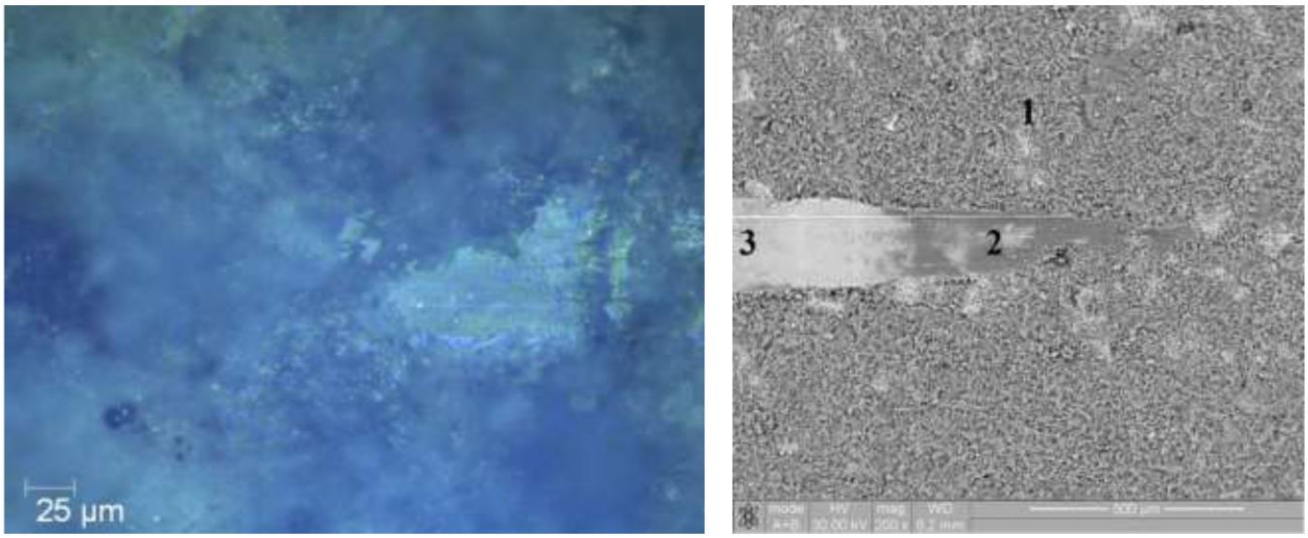


Рисунок 4.42 – Зависимости изменения акустической эмиссии и коэффициента трения от приложенной нагрузки образца со стандартным ПМ



а) б)

Рисунок 4.43 – Изображение участков царапины образца со стандартным ПМ (нагрузка L_C = 65,46 Н): (а) оптическое (х800) и (б) растровое х200

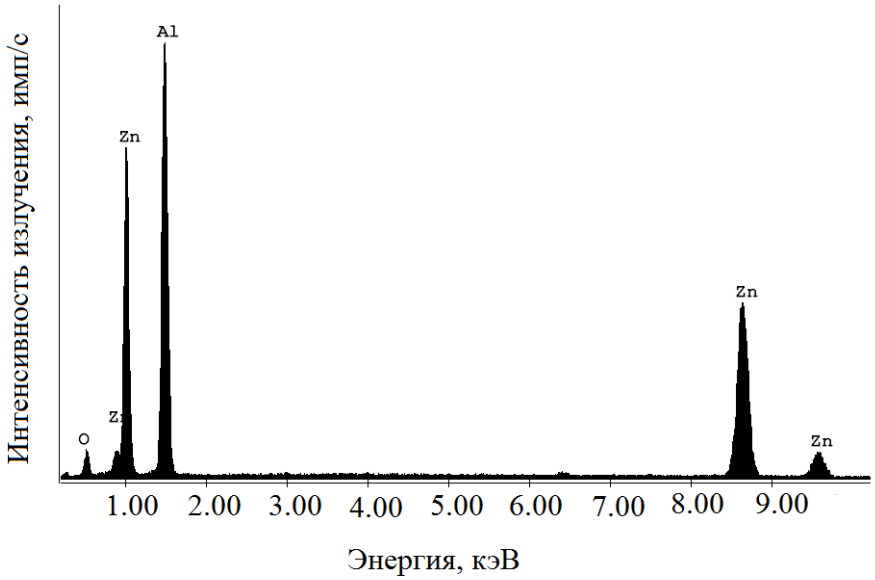


Рисунок 4.44 ¬РСМА царапины покрытия со стандартным ПМ в точке 1

Таблица 4.25 – РСМА царапины покрытия со стандартным ПМ в точке 1

Элемент	Массовая доля, %	Атомарная доля, %
O	4,87	10,71
Al	49,65	64,79
Zn	45,48	24,50
Итого	100	100

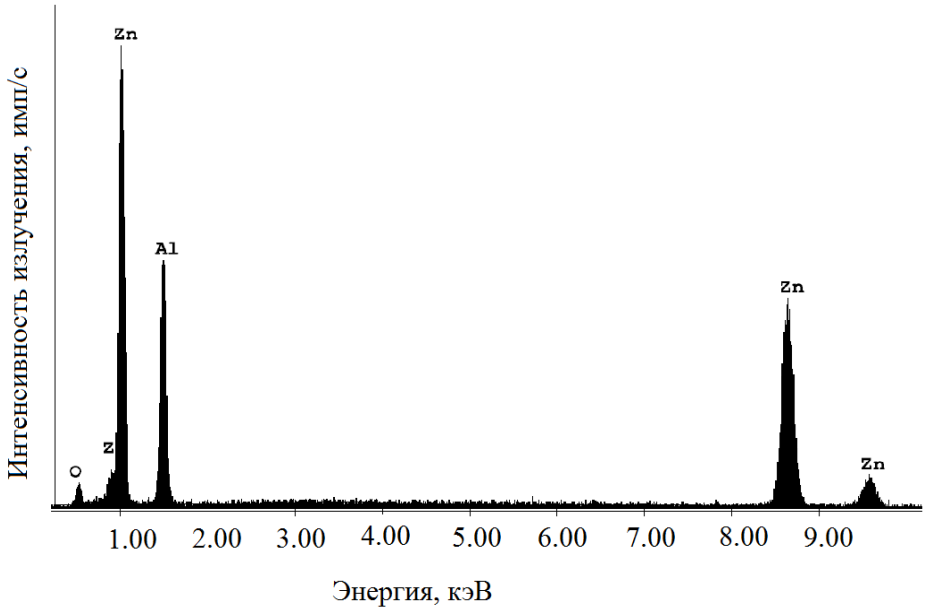


Рисунок 4.45 ¬РСМА царапины покрытия со стандартным ПМ в точке 2

Таблица 4.26 – РСМА царапины покрытия со стандартным ПМ в точке 2

Элемент	Массовая доля, %	Атомарная доля, %
O	4,46	10,85
Al	38,21	55,06
Zn	57,32	34,09
Итого	100	100

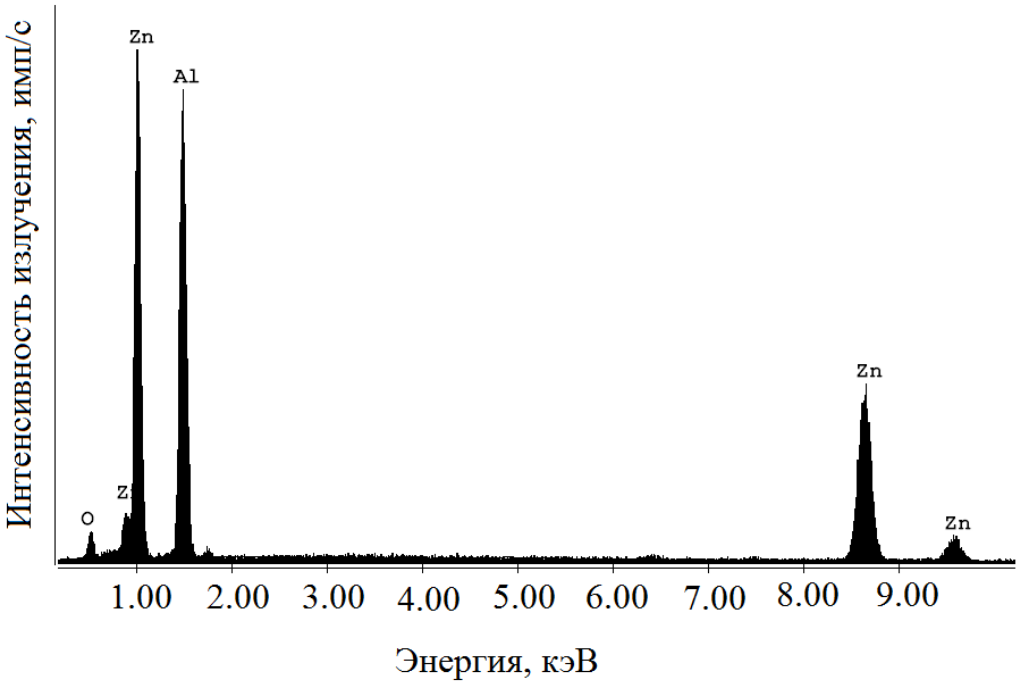


Рисунок 4.46 ¬РСМА царапины покрытия со стандартным ПМ в точке 3

Таблица 4.27 – РСМА царапины покрытия со стандартным ПМ в точке 3

Элемент	Массовая доля, %	Атомарная доля, %
O	4,97	10,80
Al	50,99	65,75
Zn	44,04	23,44
Итого	100	100

Таблица 4.28– Результаты адгезионных испытаний

Адгезионная прочность, МПа	Образец со стандартным ПМ	Образец с экспериментальным ПМ
Обозначение на рис. 4.37, 4.42 – 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		

Экспериментально установлено, что покрытие полученное способом газодинамического напыления с использованием стандартного порошка марки А-20-11 начинает разрушаться при минимальной (критической) нагрузке Lc равной 65,46 МПа, а покрытие, полученное с использованием экспериментального порошкового материала начинает разрушаться при нагрузке Lc =81,39 МПа.

На основании этого можно сделать выводы, что твердость покрытий с использованием электроэрозионного порошкового материала на 13 % выше, а адгезионная стойкость на 20 % выше, чем у покрытий, полученных с использованием стандартного порошка марки А-20-11.

4.10 Результаты исследования коррозионной стойкости газодинамических покрытий

Результаты измерений потенциала разомкнутой цепи материалов $E_{рц}$ для покрытий приведены в таблице 4.29 на рисунке 4.47.

Для образца с экспериментальным ПМ $E_{рц}$ повышается от - 876,08 до - 793,41 мВ. Такое поведение потенциала означает, что на поверхности материала присутствует слой оксидной пленки до погружения в рабочий раствор, и он мо-

дифицируется в результате двух процессов – растворение и восстановление. За счет этого происходят колебания потенциала [119].

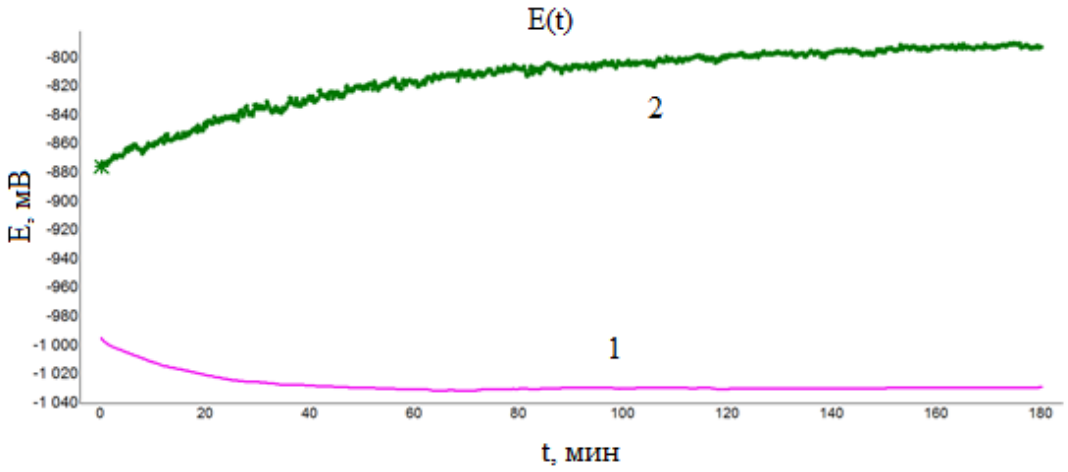


Рисунок 4.47 – Потенциал $E_{рц}$: 1 – образец со стандартным ПМ; 2 – образец с экспериментальным ПМ

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 [119.].

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 выше, что должно говорить о более стойкой к коррозионной среде структуре, чем у образца со стандартным ПМ.

Результаты измерений поляризационных кривых образцов с покрытием представлены на рисунке 4.48 . Результаты исследования потенциала и тока коррозии, представлены в таблице 4.29.

Из изучения кривых зависимости тока от потенциала эффекта пассивации

для всех изученных покрытий выявлено не было.

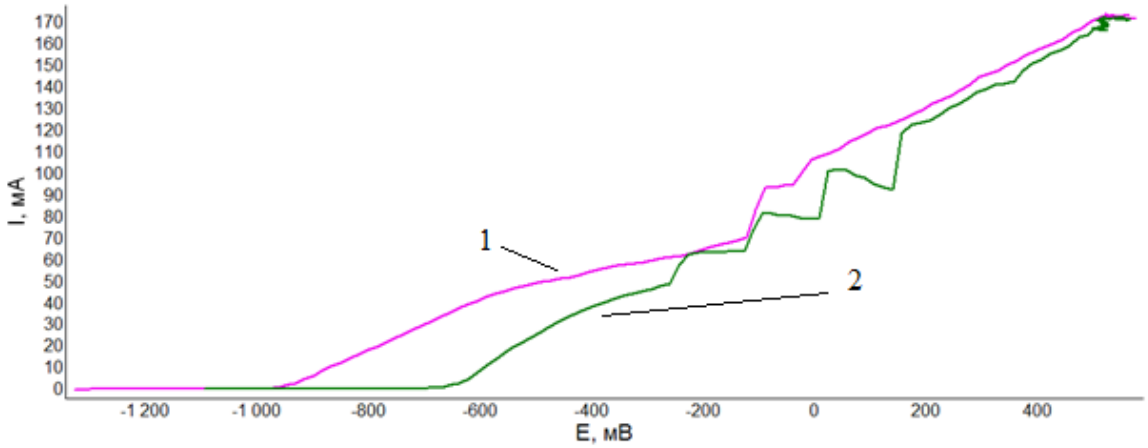


Рисунок 4.48 – Поляризационные кривые: 1 – образец со стандартным ПМ; 2 – образец с экспериментальным ПМ

Из графика (рисунок 4.36) видно, что разрушение образцов происходит неравномерно, с образованием дефектов и трещин. В результате образования трещины электролит локально достигает подложки, изменяя потенциал и вызывая скачки на графике.

Перестроение графиков по методу Тафеля для покрытий представлено на рисунке 4.49. Результаты исследования потенциала и тока коррозии, представлены в таблице 4.29.

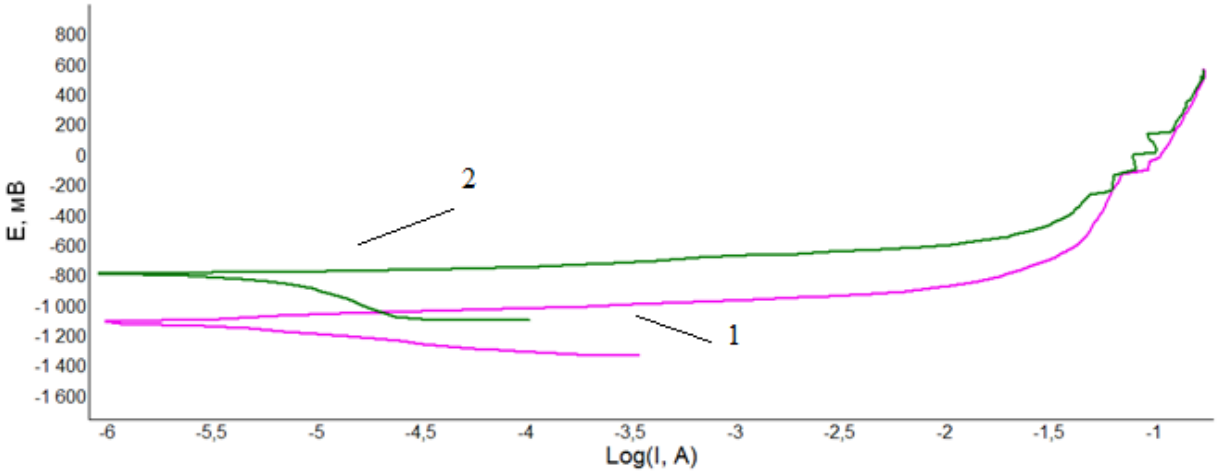


Рисунок 4.49 – Тафелевские поляризационные кривые: 1 – образец со стандартным ПМ; 2 – образец с экспериментальным ПМ

Таблица 4.29 – Результаты исследования коррозионной стойкости покрытий

Образец	$E_{рц0}$, мВ	$E_{рц3}$, мВ	$E_к$, мВ	$I_к$, мА	$E_{кТ}$, мВ	$I_{кТ}$, мА
со стандартным ПМ	-1029,8	-1328,2	43,90	113,01	-1095,5	0,0025735
с экспериментальным ПМ	-795,91	-1094,7	271,13	134,91	-766,7	0,0064171

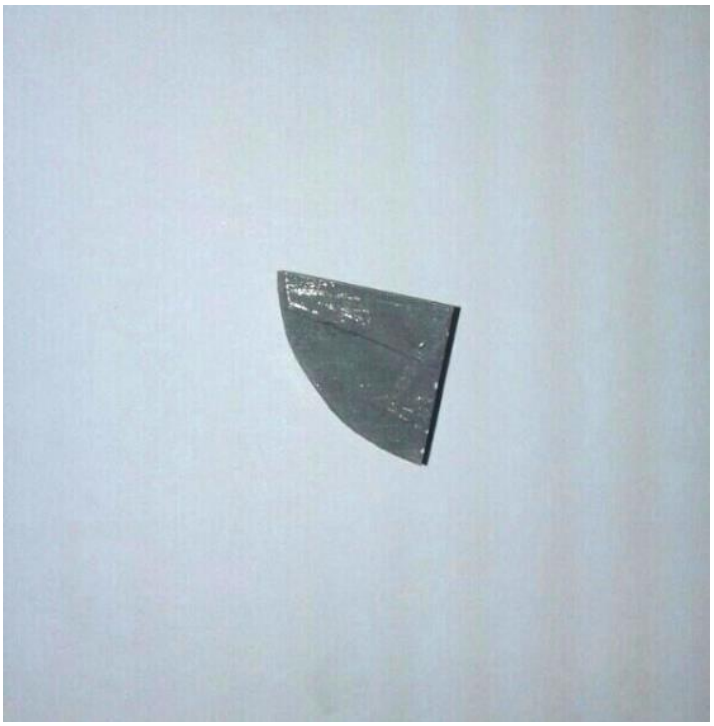
Примечание: $E_{рц0}$ – потенциал разомкнутой цепи в начале испытания; $E_{рц3}$ – потенциал разомкнутой цепи через три часа после погружения образца в рабочий раствор; $E_к$ – потенциал коррозии; $I_к$ – ток коррозии; $E_{кТ}$ – потенциал коррозии, полученный экстраполяцией Тафеля; $I_{кТ}$ – ток коррозии, полученный экстраполяцией Тафеля.

В результате исследований было установлено, что наибольшую коррозионную стойкость показал образец с экспериментальным ПМ.

4.11 Результаты исследования на устойчивость к воздействию температуры газодинамических покрытий

Исследование на устойчивость к воздействию температуры было проведено по ГОСТу Р 51368-99 (метод 205-2. Постепенное изменение температуры «метод одной камеры»). Минимальное значение температуры - 30±1°С,максимальное значение температуры + 110±1°С. Время выдержки при нижнем и верхнем значении температуры составило по 2 часа. Образец помещали в камеру для испытаний в условиях переменных высоких и низких температур и влажности КХТВ-1-005.

Фотографии исследуемых образцов представлены ниже (рисунок 4.50,4.51) Визуально оценивали состояние поверхности образца после испытания. В результате проведенных испытаний на поверхности образцов не зафиксированы дефекты (отслоения, трещины).



а)

б)

Рисунок 4.50– Фотография образца со стандартным ПМ до (а) и после (б) испытания на устойчивость к воздействию температуры

а)

б)

Рисунок 4.51 – Фотография образца с экспериментальным ПМ до (а) и после (б) испытания на устойчивость к воздействию температуры

4.12 Результаты эксплуатационных испытаний

Три головки блоков цилиндров двигателя ЗМЗ-406, восстановленные по предложенной технологии, были установлены на двигатели автомобилей ГАЗель в условиях ООО «КСТ» г. Курск. 18.07.2017 г. (Приложение Д).

Диагностирование и проверка основных параметров головок блоков цилиндров двигателя ЗМЗ-406, восстановленных способом газодинамического напыления с применением электроэрозионных порошковых материалов после 1 календарного года эксплуатационных испытаний были проведены 19.07.2018 г. (Приложение Е).

Визуальный осмотр 3-х восстановленных головок блоков цилиндров способом газодинамического напыления с применением электроэрозионных материалов после эксплуатационных испытаний показал, что на плоскости прилегания к блоку цилиндров отсутствуют следы коррозии и раковины. На головках блоков цилиндров №1 и №2 трещины не обнаружены, а в образце №3 присутствует трещина на перемычке между клапанными гнездами длиной 6 мм. Трещина образована не на покрытии, полученном способом газодинамического напыления.

Испытание на герметичность 3-х восстановленных головок блоков цилиндров способом газодинамического напыления с применением электроэрозионных материалов при давление 0,25-0,30 МПа (2,5-3,0 кгс/см^2) показали, что две головки блоков цилиндров герметичны, а головка блока цилиндров №3 имеет течь.

Диагностирование и проверка основных параметров головок блоков цилиндров двигателя ЗМЗ-406, восстановленных способом газодинамического напыления с применением электроэрозионных порошковых материалов после 1 календарного года эксплуатации показали, что на всех трех головках блоков цилиндров нарушения газодинамических покрытий не произошло. На всех экспериментальных изделиях не наблюдается следов отслоения газодинамических покрытия, трещин, а также следов коррозии. Экспериментальные изделия оставлены на автомобилях для дальнейшей эксплуатации

Пробег автомобиля с восстановленной ГБЦ определим по формуле:

$$S = S_{сут} \times n, \qquad (4.14)$$

где $S_{сут}$-средний суточный пробег автомобиля, км;

n – количество дней эксплуатации.

Получаем:

$S = 240 \times 485 = 116400$ км.

На основании этого можно сделать вывод о том, что способом газодинамического напыления с применением электроэрозионных материалов можно восстанавливать дефектные головки блоков цилиндров, причем себестоимость восстановления в 1,5-2 раза ниже, чем себестоимость восстановления промышленно выпускаемыми порошковыми материалами.

4.13 Технологические рекомендации по восстановления дефектных головок блока цилиндров двигателя ЗМЗ – 406

Разработанный маршрутно-операционная технология восстановления головок блоков цилиндров включает в себя устранение способами газодинамического напыления основных аварийных дефектов, а именно трещин между седлами клапанов и раковин на привалочной плоскости ГБЦ. В процессе разработки маршрутно-операционной технологии были отработаны режимы и технологические приемы операций нанесения восстановительных покрытий способами газодинамического напыления и режимы механической обработки.

В настоящее время развитие современного ремонтного производства в направлении универсальных мобильных технологий восстановления деталей, реализованных в условиях производств, с небольшой программой, разнообразной номенклатурой и наименованием восстанавливаемых деталей подразумевает использование недорогого мобильного технологического оборудования для нанесения покрытий ГДН [68-73].

На данный момент разработана маршрутно-операционная технология, про

цесса восстановления головок блоков цилиндров двигателей автомобилей газодинамическим напылением с применением электроэрозионных алюмосодержащих порошковых материалов (таблица 4.30).

Таблица 4.30 – Маршрутно-операционная технология восстановления ГБЦ двигателя ЗМЗ-406 газодинамическим напылением

№, п/п	Наименование операции	Оборудование	Приборы и инструменты
1	2	3	4
005	Очистная 1. Вымыть ГБЦ двигателя в моющем средстве «симаклин», с концентрацией раствора 5 % при температуре 50 °С в течении 20 мин., для удаления нагара и смоляных отложений, а также для обнаружения всех дефектов.	Автоматическая промывочная установка АМ600 ЭКО (АПУ 600)	Симаклин (щелочное моющее средство), ветошь обтирочная ГОСТ 5354-79
010	Дефектовочная 1. Визуальный осмотр с целью выявления трещин и раковин. Испытание на герметичность давлением 0,25-0,30 МПа (2,5-3,0 кгс/см^2) 2. Проверка коробления поверхности прилегания к блоку цилиндров или коррозия поверхности (0,1-0,4 мм)	Стенд для опрессовки ГБЦ «УГ1200»	Лупа ЛИ-3-10х, линейка ЩП-2-630
015	Сверлильная Удлинить поврежденный участок. Трещину необходимо максимально глубоко расчистить под углом 90-120°, чтобы полностью удалить следы трещины и придать ей правильную геометрическую форму.	Вертикально-сверлильный станок 2Н125	Кондуктор, патрон, прижимы, сверло спиральное с коническим хвостовиком Ø16,4мм ГОСТ 10903-77

Продолжение таблицы 4.30

1	2	3	4
020	Газодинамическая 1. Закрыть каналы защитными крышками, чтобы избежать попадания в них ПМ. 2. Засыпать ПМ в бункеры питателей установки ДИМЕТ-404. В первый бункер засыпается ПМ корунда, а во второй алюмосодержащий ПМ. 3. Выбрать первый питатель на панели управления установки и произвести абразивную очистку установкой ДИМЕТ-404 с использованием ПМ корунда. 4. Выбрать второй питатель, произвести напыление алюмосодержащим ПМ на расстоянии 10-15 мм при давлении воздуха 0,5 МПа, температурном режиме №3 и расход порошка – 0,2 г/с. Пистолет необходимо держать под углом 90-45°.	Шкаф вытяжной. Установка для ГДН ДИМЕТ – 404	Защитные крышки, прижимы, электроэрозионный ПМ.
025	Фрезеровальная Фрезеровать плоскость прилегания к блоку цилиндров, до удаления лишнего напыленного материала.	Вертикально фрезерный станок 6Н11	Цанговый патрон ГОСТ 26539-85, прижимы; Фреза торцевая со вставными зубьями из твердого сплава ВК8 ГОСТ 24359-80
030	Очистная 1. Вымыть ГБЦ двигателя в моющем средстве «симаклин», с концентрацией раствора 5 % при температуре 50 °С в течении 10 мин., для удаления следов восстановления.	Автоматическая промывочная установка АМ600 ЭКО (АПУ 600)	Симаклин (щелочное моющее средство), ветошь обтирочная ГОСТ 5354-79

Продолжение таблицы 4.30

1	2	3	4
035	Контрольная 1. Визуальный осмотр восстановленной поверхности на наличие трещин или отслоения напыленного ПМ. Испытание на герметичность давлением 0,25-0,30 МПа (2,5-3,0 кгс/см^2) 2. Проверка коробления поверхности прилегания к блоку цилиндров или коррозия поверхности (0,1-0,4 мм)	Стенд для опрессовки ГБЦ «УГ1200»	Лупа ЛИ-3-10х, линейка ЩП-2-630

В диссертационной работе разработана маршрутно-операционная технология восстановления головок блоков цилиндров способом газодинамического напыления с применением электроэрозионных порошковых материалов.

Способом газодинамического напыления с применением алюмосодержащих электроэрозионных материалов можно выполнять восстановление эксплуатационных характеристик не только дефектные ГБЦ, а также использовать разработанные технологические решения при восстановлении эксплуатационных характеристик широкой номенклатуры автомобильных деталей из алюминиевых сплавов. Также можно применять алюмосодержащие электроэрозионные материалы для нанесении защитных (антикоррозионных) покрытий.

4.14 Реализация результатов исследований и их технико-экономическая оценка

Расчет экономической эффективности от внедрения технологии 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 ГБЦ ДВС в год.

Отсутствие эффективной и недорогой технологии восстановления ГБЦ двигателей автомобилей с аналогичными аварийными дефектами (особенно иностранных марок) приводит к их заменам на новые. Следовательно, экономическую эффективность определяли в сравнении со стоимостью новой детали:

Расчет экономического эффекта сделан по формуле [118]:

$$Э = \left(Ц_н \cdot h \cdot \frac{P_1 + E_н}{P_2 + E_н} - (C + E_Н \cdot К) \cdot N_{ВОС}\right) \quad (4.15)$$

где Э – экономический эффект, руб.;

ЦН – оптовая цена новой детали данного наименования, руб.;

h – коэффициент учета затрат на доставку новых деталей (равен 1,1);

P_1 и P_2 – величины, обратные срокам службы новой и восстановленной детали;

$E_Н$ – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений (равен 0,15);

С – себестоимость восстановления деталей или ремонтно-технологического оборудования по предлагаемой технологии, руб.;

К – удельные капитальные вложения на приобретение и установку ремонтно-технологического оборудования, руб.;

N – годовой объем восстанавливаемых деталей, шт.

Отношение $\frac{P_1 + E_н}{P_2 + E_н}$ принято равным 0,91, исходя из отношения ресурса работы новой ГБЦ (100%) и восстановленной ГБЦ (90%) по усталостной прочности. Для ГБЦ это отношение принято равным 1.

Согласно «Рекомендациям по обоснованному применению технологических процессов восстановления ГБЦ автомобилей двигателей ЗМЗ-53 и ЗИЛ-130» [118] формула 4.15 может принимать немного упрощенный вид (4.16). Тогда годовой экономический эффект, который может быть получен при восстановлении ГБЦ рекомендуемым способом вместо действующего способа, определяется по формуле:

$$Э = [h \times Ц_н \times К_{пр} - (С_{вос} + Е_н \times К)] \times N_{вос} \quad (4.16)$$

где h – коэффициент, учитывающий затраты по доставке деталей на ремонтное предприятие (равен 1,1);

$Ц_н$– оптовая цена производства новой ГБЦ, руб.

$К_{пр}$ – коэффициент приведения цены ГБЦ, восстановленной рекомендуемым способом к цене ГБЦ, восстановленной действующим способом (при отсутствии действующего техпроцесса за основу сравнения принимается цена новой ГБЦ);

$Е_н$ – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений Ен = 0,15;

$N_{вос}$ – годовая программа восстановления ГБЦ;

К – удельные капитальные вложения, руб.

$$К = \frac{Б_{об}+Б_{осн}+Б_{зд}}{N_{вос}} \quad (4.17)$$

$Б_{об}$ – балансовая стоимость оборудования, предусмотренного техпроцессом восстановления ГБЦ, руб;

$Б_{осн}$ – балансовая стоимость технологической и контрольно-измерительной оснастки, предусмотренной техпроцессом, руб;

$Б_{зд}$ – балансовая стоимость здания, в котором размещены участок или линия по восстановлению ГБЦ, руб;

($С_{вос}$ + $Е_{нК}$) – приведенные затраты на восстановление ГБЦ с учетом ее остаточной стоимости (определяется по цене металлолома), руб;

$С_{вос}$ – себестоимость восстановления одной ГБЦ, руб.

Себестоимость восстановления является одним из основных экономических показателей, который характеризует совершенство технологического процесса.

Рассчитывается по формуле [109]:

$$С_{вос}= С_{ост}+ С_м+ С_з+ С_а+ С_{т.р.}+ С_{цех}+ С_{зав}+ С_{вн}+ С_{всп}, \text{ руб.}, \quad (4.18)$$

где $C_{ост}$ – остаточная стоимость ГБЦ; обычно определяют по цене металлолома. Если ремонтный фонд собран на других предприятиях, то в стоимость дефектной ГБЦ входит 20%-ная добавка за сбор и сортировку деталей.

$C_м$ – затраты на материалы включают все затраты на все материалы, применяемые для восстановления данной ГБЦ; $C_з$ – зарплата с начислениями; $C_а$ – затраты на амортизационные отчисления по оборудованию, оснастке и зданию; $C_{т.р.}$ – затраты на содержание и текущий ремонт оборудования; $C_{цех}$ – цеховые расходы; $C_{зав}$ – общезаводские расходы; $C_{вн}$ – внепроизводственные расходы; $C_{всп}$ – вспомогательные затраты (затраты на электроэнергию, воду, сжатый воздух).

Для того, чтобы определить какой из двух способов напыления (рекомендуемый или действующий) обеспечивает больший экономический эффект, их сравнение следует проводить в условиях применения на одном предприятии, т.е. считать, что восстановление ГБЦ одной марки ведется действующим способом и будет производиться рекомендуемым способом при одинаковых годовых программах восстановления; одинаковом количестве устраняемых дефектов; использовании на всех операциях, кроме операций напыления трещин и газовой эрозии, одинакового оборудования (дефектовочного, моечного, оборудования для механической обработки и т.д.) и оснастки.

При этих условиях в структуре себестоимости ГБЦ одной марки, восстановленных рекомендуемым и действующим способами, составляющие $C_а$, $C_{т.р.}$, $C_{цех}$, $C_{зав}$, $C_{вн}$ будут иметь близкие значения, а составляющие $C_{всп}$ будут иметь столь малые в сравнении с другими составляющими значения, что ими можно пренебречь. Таким образом, различие себестоимостей восстановления ГБЦ рекомендуемым и действующим способами по формуле 4.18 определяется величинами затрат на материалы для восстановления и зарплаты с начислениями. А различие в годовом экономическом эффекте по формулам 4.16 и 4.17 – величинами приведенных затрат на восстановление, которые являются функциями себестоимости восстановления и балансовой стоимости оборудования для восстановления [118].

Основными резервами снижения себестоимости восстановления деталей являются:

– снижение трудоемкости процессов восстановления за счет повышения уровня механизации и автоматизации производства;

– уменьшение удельной энергоемкости процессов, т.е. уменьшение расходов электроэнергии, газа, пара, сжатого воздуха в расчете на единицу площади восстанавливаемой поверхности;

– применение прогрессивных процессов, базирующихся на способах пластической деформации, наращивании с минимальными припусками на последующую обработку, применении полимерных материалов при условии обеспечения заданного качества восстановленных ГБЦ;

– увеличение размера партий и программ восстановления однотипных деталей.

Подставляя необходимые данные в формулы 4.17 и 4.18, получаем следующее:

$$К = \frac{Б_{об}+Б_{осн}+Б_{зд}}{N_{вос}} = \frac{6300000}{70} = 90000 \text{ руб.}$$

$$С_{вос} \approx 2000 \text{ руб.}$$

Получив значения себестоимости восстановления ГБЦ по рекомендуемой технологии и величины удельных капитальных вложений на приобретение и установку ремонтно-технологического оборудования, можно рассчитать экономический эффект от внедрения рекомендуемой технологии на предприятие по формуле 4.15, либо 4.16.

Э = [h×Цн×Кпр – (Свос + Ен×К)]×Nвос = [1,1×35000×0,91 – (2000+0,15×90000)] ×70 = (35035 – 15500) ×70 = 1049965 руб.

Таким образом, расчетный экономический эффект от внедрения предложенной технологии восстановления ГБЦ ДВС автомобиля способом ГДН с применением электроэрозионным ПМ в ООО «КСТ» г. Курск составит 1049965 рублей за 1 год.

4.15 Выводы к главе 4

1. Экспериментальные исследования алюмосодержащего порошкового материала (параметры: С – 65 мкФ; Ux – 90 В; V – 50 Гц.) показали, что 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 ПМ. Основными фазами в алюмосодержащего ПМ являются Al_2O_3, $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ и $Al(OH)_3$.

2. Экспериментальные исследования ПМ (параметры: С – 65 мкФ; Ux – 100 В; V – 140 Гц.) показали, 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 порошкового материала. Основными фазами в алюмосодержащем порошковом материале являются байерит – $Al(OH)_3$ и гиббсит – $Al(OH)_3$.

3. Способ газодинамического напыления является наиболее перспективным для восстановления рабочих поверхностей дефектных головок блоков цилиндров, а ПМ, полученный способом электроэрозионного диспергирования при следующих параметрах установки: ёмкость разрядных конденсаторов 65 мкФ, напряжение 90 В, частота импульсов 60 Гц., хорошо очищает поверхность перед напылением. Экспериментально установлено, что твердость покрытий с использованием электроэрозионного порошкового материала на 13 % выше, а адгезионная стойкость на 20 % выше, чем у покрытий, полученных с использованием стандартного ПМ марки А-20-11.

4. Из графиков зависимости пористости газодинамических покрытий от давления воздуха, расхода порошкового материала и среднего размера напыляемых частиц 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 %.

5. С целью определения оптимальных параметров восстановления дефектной ГБЦ установкой для газодинамического напыления ДИМЕТ-404 проводилась постановка факторного эксперимента. Для эксперимента были выбраны три фактора: X_1 (давление воздуха (P), МПа; X_2 (расход ПМ (Q), г/с; X_3 (средний размер частиц (D), мкм. По результатам эксперимента вычислили коэффициенты модели: b_0= 75,9; b_1 = 8,5; b_2 = 6,3; b_3 = 20,5; b_{12} = 0,5; b_{13} = 6,1; b_{23}= 1,3; b_{123} = 0,1. Значимость коэффициентов проверяли по отдельности по критерию Стьюдента (формула 4.9). 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. Получили уравнение регрессии в виде полинома первой степени $Y = 75,9 + 8,5X_1 + 6,3X_2 + 20,5X_3 + 6,1 \cdot X_1 X_3 + 1,3 \cdot X_2 X_3$. 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.

6. Проверку адекватности модели производили по F-критерию Фишера. В результате расчетов получили F_p = 1,9. Табличное значение Fт – критерия при 5 % уровне значимости и числах степеней свободы для числителя 4 и для знаменателя 2 равно 19,3. Fp<Fт. Следовательно, модель адекватна. По окончании эксперимента на новых уровнях было получено максимальное значение параметра оптимизации Y, которое составило 81,4 МПа. Таким образом, учитывая данные экспериментальных исследований пористости покрытий, полученные в пункте 4.5 и расчеты полного факторного эксперимента, можно сделать вывод, что оптимальными параметрами для процесса восстановления дефектной ГБЦ способом газодинамического напыления с применением электроэрозионных ПМ являются:

средний размер напыляемых металлических частиц 20 мкм, давление воздуха 0,5 МПа, температурный режим №3, расход порошкового материала 0,2 г/с.

7. Испытания коррозионной стойкости газодинамических покрытий, проведенные по методике ускоренных испытаний с помощью многоканального потенциостат-гальваностата «Elins P-20X8» показали, что наибольшую коррозионную стойкость имеет образец с экспериментальным ПМ.

8. В результате исследования покрытий на устойчивость к воздействию температуры проведенных по ГОСТу Р 51368-99 на поверхности образцов не зафиксированы дефекты и отслоение покрытия.

9. Разработана маршрутно-операционная технология заделки трещин в головке блока цилиндров, а также технологический процесс устранения раковин на поверхности, прилегающей к блоку.

10. Диагностирование и проверка основных параметров головок блоков цилиндров двигателя ЗМЗ-406, восстановленных способом газодинамического напыления с применением электроэрозионных порошковых материалов после 1 календарного года эксплуатации показали, что на всех трех головках блоков цилиндров нарушения газодинамических покрытий не произошло. На всех экспериментальных изделиях не наблюдается следов отслоения газодинамических покрытия, трещин, а также следов коррозии. Экспериментальные изделия оставлены на автомобилях для дальнейшейэксплуатации

11. Экономической эффект от внедрения предложенной технологии восстановления ГБЦ ДВС автомобиля способом ГДН с применением электроэрозионным ПМ в ООО «КСТ» составил 1049965 руб.

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. Способом газодинамического напыления с применением электроэрозионных порошковых материалов можно восстанавливать широкую номенклатуру автомобильных деталей из алюминиевых сплавов, а также наносить защитные (антикоррозионные) покрытия.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Иванов, В.И. Применение электроискрового и холодного газодинамического методов нанесения металлопокрытий при ремонте блоков цилиндров / В.И. Иванов, А.Ю. Костюков, В.А. Денисов, Н.В. Раков, А.В. Потапов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2012. № 3. С. 11-15.

2. Способы и технологические процессы восстановления изношенных деталей: учебное пособие / П.К. Логинов, О.Ю. Ретюнский; Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 217 с.

3. Новиков, А.Н. Восстановление и упрочнение деталей автомобилей: учебное пособие /А.Н. Новиков, М.П. Стратулат, А.Л. Севостьянов – Орел: ОрелГТУ, 2006. – 332 с.

4. Власов, В. М. Техническое обслуживание и ремонт автомобилей / В.М. Власов, С. В. Жанказиев, С. М. Круглов [и др.]. – 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 480 с.

5. Молодык, Н. В., Восстановление деталей машин / Н. В. Молодык, А.С.Зенкин — М.: Машиностроение, 1989. — 480 с. (Справочники для рабочих)

6. Карагодин, В. И. Ремонт автомобилей и двигателей / В.И. Карагодин, Н. Н. Митрохин. – М.: Высшая школа, 2001. – 469 с.

7. Восстановление и упрочнение изношенных деталей автомобилей электроискровой обработкой электроэрозионными наноматериалами / Р.А. Латыпов, В.А. Денисов, Е.В. Агеев, В.Ю Карпенко // Монография. Курск, 2016.

8. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 –х т. Т.1. / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1986. – 656 с.

9. Шадричев, В. А. Основы технологии автостроения и ремонт автомобилей / В. Л. Шадричев.– Л.: Машиностроение, 1976. – 560 с.

10. Сергеев, Н.В. Силовые агрегаты. Конспект лекций: учебное пособие / Н.В. Сергеев – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВПО ДГАУ, 2015. – 186 с.

11. Российская автотранспортная энциклопедия. В 3-х т. Т.3. Техническая эксплуатация и ремонт автотранспортных средств: справочное и научно-практическое пособие для специалистов отрасли «Автомобильный транспорт» для студентов и научных сотрудников профильных учебных заведений, НИИ. – М.: Междунар. центр труда; Изд-во «Региональная общественная организация инвалидов и пенсионеров», 2000. – 456 с.

12. Надежность и ремонт машин / В.В. Курчаткин, Н.Ф. Тельнов, К.А. Ачкасов и др.; под ред. В. В. Курчаткина. – М.: Колос, 2000. – 776 с.: ил.

13. Новиков, А. Н. Технология ремонта машин : учеб. пособие. / А.Н. Новиков, Н.В. Бакаева, А.В. Коломейченко. – Орел: ОрелГТУ, 2003. – 59 с.

14. Новиков, А.Н. Ремонт деталей из алюминия и его сплавов: учеб. Пособие. – Орел: Орловская государственная сельскохозяйственная академия, 1997. – 57 с.

15. 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.

16. Коломейченко, А. В. Восстановление сильно изношенных деталей из алюминиевых сплавов [Текст] / А. В. Коломейченко // Ремонт, восстановление, модернизация. - 2002. - № 1. – С. 29-32.

17. Капитальный ремонт автомобилей: справочник / Л.В. Дехтеринский, Р.Е. Есенберлин, К.А. Акмаев[и др.]; под ред. Р.Е. Есинберлина. – М.: Транспорт, 1989. – 335 с. ; ил.

18. Васильев, В.С. Ремонт дорожных машин, автомобилей и тракторов / В.С. Васильев, Б.П. Долгополов, Г.Н. Доценко, В.А. Зорин [и др.]; под ред. В.А. Зорина. – М.: Издательство «Мастерство», 2001. – 512 с.

19. Зорин, В.А. Надежность машин: учебник для вузов / В.А. Зорин, В.С. Бочаров. – Орел: Орел ГТУ, 2003. – 549 с.

20. Восстановление автомобильных деталей: Технология и оборудование: учебник для вузов / В. Е. Канарчук, А.Д. Чигринец, О.Л. Голяк, П.М. Шоцкий. – М. : Транспорт, 1995. – 303с. : ил.

21.Коломейченко, А. В. Перспективные направления восстановления изношенных деталей из алюминиевых сплавов с последующим упрочнением МДО [Текст] / А. В. Коломейченко, В. Н. Логачев, Н. С. Чернышов // Известие Орловского государственного технического университета, сер. Строительство. Транспорт. – 2004. - №1-2. – С. 76-81.

22.Коломейченко, А. В. Восстановление деталей из алюминиевых сплавов пайкой с последующим упрочнением микродуговым оксидированием [Текст] / А. В. Коломейченко, Н. С. Чернышов // Ремонт, восстановление, модернизация. - 2004. - №8. – С. 27-28.

23.Коломейченко, А. В. Повышение износостойкости внутренних цилиндрических поверхностей деталей машин при использовании комбинированной технологии микродугового оксидирования и нанесения медного слоя [Текст] / А. В. Коломейченко, Н. В. Титов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. - №7. – С.39-43.

24.Коломейченко, А. В. Технология восстановления и упрочнения микродуговым оксидированием юбок поршней двигателей внутреннего сгорания из алюминиевых сплавов [Текст] / А. В. Коломейченко // Ремонт, восстановление, модернизации. – 2007. - №4. – С. 17-18.

25.Коломейченко, А. В. Технологические приемы повышения долговечности подвижных соединений и деталей машин, упрочненных микродуговым оксидированием [Текст]/ А. В. Коломейченко // ТРУДЫ ГОСНИТИ. – 2010. – Т.105. – С. 155-160.

26. Материаловедение и технология металлов: учебник для студентов машиностроит. спец. вузов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин [и др.]; под ред. Г.П. Фетисова. – М.: Высш. шк., 2001. – 638 с.; ил.

27. Сварка и свариваемые материалы: В 3-х т. Т. 2. Технология и оборудование : справ.изд. / под ред. В. М. Ямпольского. - М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. -574 с. : ил.

28.Асиновская, Г.А. Газовая сварка и наплавка цветных металлов и сплавов / Г.А. Асиновская, П.М.Любанин, В.И. Колычев. - М.: Машиностроение, 1974. - 275 с.: ил.

29.Рабкин, Д.М. Сварка алюминия и его сплавов со сталью и медью / Д.М. Рабкин, В.Р. Рябов. - М.: Машиноостроение,1963. - 93с.: ил.

30. Хасуй, А. Наплавка и напыление / А. Хасуй, О. Моригани- М.: Машиностроение, 1985.- 297 с.: ил.

31. Современное оборудование и технологические процессы для восстановления изношенных деталей машин. // Тез.докл. на науч. техн. конф. Ремдеталь-83. – М., 1983 – С.158.

32.Кудинов, В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В.В. Кудинов, Г.В. Бобров. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.

33. Сидоров, А.И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. - М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.

34. Технологические процессы восстановления деталей плазменным напылением порошков и проволокой. - М., 1989. – 48 с.

35. Григор, З.В. Плазменное напыление алюминиевых деталей при ремонте импортной строительной техники / З.В. Григор, А.И. Комаров, А.И. Куликов. // Сварочное производство. - 1990. – №9. – С.18-19.

36. Эдельсон, А.М. Применение металлизации для восстановления изношенных деталей машин. – М.: Машгиз. 1960 – 73 с.

37.Лайнер, В.И. Защитные покрытия металлов. - М.: Металлургия, 1974.-559с.: ил.

38. Полевой, С.Н. Упрочнение металлов: Справочник. / С.Н. Полевой, В.Д. Евдокимов. - М.: Машиностроение. 1986. – 320 с.: ил.

39. Вартелеев, С.С. Детонационные покрытия в машиностроении / С.С. Вартелеев, Ю.П. Федько, А.И. Гиргоров – М. : Машиностроение, 1982. – 215 с. : ил.

40. Суслов, А.Г. Технология машиностроения: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2005. – 397с.

41. Черноиванов, В.И. Восстановление деталей машин. – М.: ГОСНИТИ, 1995. – 278с.

42. Ольховатский, А.К. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки при восстановлении деталей машин / А.К. Ольховатский, В.П.Лялякин ; под ред. Лялякина В.П. - М., 1996. - 40 с.: ил.

43. Лившиц, А.С. Наплавочные материалы и технология наплавки для повышения износостойкости и восстановления деталей машин. // Сварочное производство. – 1991. № 1. - С. 15-17.

44. Верстак, А.А. Особенности взаимодействия напыляемых частиц с шероховатой поверхностью основы / А.А. Верстак, И.А.Куприянов, А.Ф. Ильющеко // Сварочное производство. – 1987. – №2. – С. 5-6.

45.Аношин, Е.В. Газотермическое нанесение покрытий. – М. : Машиностроение, 1974. – 96 с.

46. Черноиванов, В.И. Методика и рекомендации по восстановлению деталей способами газотермического напыления. - М. : ГОСНИТИ, 1983. – 62 с.

47. Линник, В.А. Современная техника газотермического нанесения покрытий / В.А. Линник, П.Ю. Пекшев – М. : Машиностроение, 1985. – 165 с.

48. Определение расходных характеристик при нанесении газотермических покрытий (на детали оборудования пищевой промышленности) / Н.А Амельченко, Б.А.Линев, Г.Д. Коваленко [и др.] // Сварочное производство. – 1990. - №11. – С. 19.

49. Шамко, В.К. Механическая прочность газотермических покрытий / В.К. Шамко, А.А.Ковричо // Сварочное производство. – 1991.-№12. – С. 13-15.

50. Кипарисов, С.С. Производство и применение алюминиевых порошков / С.С. Кипарисов // М.: Металлургия, 1980, 68 с.

51. Передерий, В. П. Устройство автомобиля / В. П. Передерий. – М.: Форум, 2005. – 288 с.

52. Микипорис, Ю. А. Эксплуатация и ремонт автотехники / Ю.А. Микипорис. – Ковров: КГТА, 2002. – 88 с.

53. Пантелеев, Ф. И. Восстановление деталей машин / Ф. И.Пантелеев, В. П. Лялякин, В. П. Иванов [и др.]: под ред. В. П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.

54. Бурумкулов, Ф.Х. Повышение надежности головок блока цилиндров комплексным ремонтом с применением прогрессивных методов восстановления деталей / Ф.Х. Бурумкулов, П.В. Сенин, Н.В. Раков, А.М. Макейкин // ТРУДЫ ГОСНИТИ. – 2013. –№ 2 (Т.111). – С. 4-8.

55. Воловик, Е. Л. Справочник по восстановлению деталей / Е. Л. Воловик. – М.: Колос, 1981. – 351 с.

56. Батищев, А.Н. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники / А. Н.Батищев, И. Г.Голубев, В. П.Лялякин. – М.: Информагротех, 1995. – 296 с.

57. Ермолов, Л. С. Основы надежности сельскохозяйственной техники / Л. С. Ермолов, В.М. Кряжков, В. Е. Черкун. – М.: Колос, 1974. – 223 с.

58. Кузнецов, Е. С. Техническая эксплуатация автомобилей : учебник для ВУЗов / Е. С. Кузнецов, А. П. Болдин, В. М. Власов под общ. ред. Е. С. Кузнецова. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Наука, 2001.– 535 с.

59. Сарбаев, В. И.Техническое обслуживание и ремонт автомобилей: механизация и экологическая безопасность производственных процессов / В.И. Сарбаев, С.С. Селиванов, В.Н. Коноплев, [и др.]. – Ростов н/Д: Феникс, 2004.– 448 с.

60. Бернардский, В. В. Техническое обслуживание и ремонт автомобилей : учебник / В. В. Бернардский. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 448 с. 194

61. Фролов, Ю. Н. Техническая эксплуатация и экологическая безопасность автомобильного транспорта: учебное пособие / Ю. Н. Фролов. – М.: Изд-во МАДИ (ГТУ), 2001. – 135 с.

62. Туревский, И. С. Техническое обслуживание автомобилей: учебное пособие / И. С. Туревский. – М.: Инфра-М, 2005. – Кн. 1. – 432 с.

63. Положение о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автомобильного транспорта / Минавтотранс РСФСР. – М.: Транспорт, 1988. – 73 с.

64. Кузнецов, Е. С. Управление технической эксплуатацией автомобилей / Е. С. Кузнецов. – М.: Транспорт, 1995. – 272 с.

65. Аринин, И. Н. Техническая эксплуатация автомобилей. Управление технической готовностью подвижного состава: учебное пособие / И. Н. Аринин, С.И. Коновалов, Ю.В. Баженов, [и др.]. – Владимир: Изд-во Владимирского ГУ, 2003. – 220 с.

66. Малкин, В. С. Теоретические основы технической эксплуатации автомобилей: учебное пособие / В. С. Малкин. – Тольятти: ТГУ, 2004. – 110 с.

67. Власов, В. М. Техническое обслуживание и ремонт автомобилей: учебник / С. В. Жанказиев, С. М. Круглов [и др.]. – М.: Академия, 2004. – 480 с.

68. Алхимов, А.П. Холодное газодинамическое напыление / А.П. Алхимов, С.В. Клинков, В.Ф. Косарев, В.М. Фомин // Теория и практика / Под ред. академика В.М. Фомина. Москва, 2010.

69. Ляхов, Н.З. Металлополимерные нанокомпозиты (получение, свойства, применение) / Н.З. Ляхов, А.П. Алхимов, В.М. Бузник, В.М. Фомин, Л.И. Игнатьева, А.К. Цветников // монография. Новосибирск, 2005.

70. Каширин, А.И. Метод газодинамического напыления металлических покрытий: развитие и современное состояние / А.И. Каширин, А.В. Шкодкин// Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 12 (36). С. 22-33.

71. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: Пер. с англ. – М: Мир, 1989. – 510 с., ил.

72. Кузнецов, Ю.А. Исследование характеристик покрытий, полученных холодным газодинамическим напылением / Ю.А. Кузнецов, В.В. Гончаренко // Техника и оборудование для села. 2013. № 12. С. 39-43.

73. Кузнецов, Ю.А. Теоретическая оценка деформации частиц при сверхзвуковом газодинамическом напылении / Ю.А. Кузнецов, К.В. Кулаков, А.В. Добычин // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2010. № 12. С. 72-75.

74. Воробьев, Е.А. Повышение качества восстановления коленчатых валов двигателей автомобилей плазменно-порошковой наплавкой / Е.А. Воробьев // автореферат дис. кандидата технических наук / Орлов. гос. ун-т. Орел, 2017

75. Новиков, Е.П. Исследование гранулометрического состава алюминиевого порошка / Е.П. Новиков, Е.В. Агеев //Инновации в металлообработке: взгляд молодых специалистов: сб. науч. тр. Межд. науч.-техн. конф. – Курск: ЮЗГУ – 2015 – С. 252–256.

76. Агеева, Е.В. Сравнительный рентгеноструктурный анализ газодинамических покрытий головок блоков цилиндров / Е.В. Агеева, Е.П. Новиков, Н.А. Пивовар // Известия ЮЗГУ. – 2018. – №1 (76). – С. 78-86.

77. Новиков, Е.П. Рентгеноспектральный анализ порошка алюминия полученного методом ЭЭД / Е.П. Новиков, Е.В. Агеев// Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ- 2015): сб. статей VII Межд. науч.-техн. конф.– Курск: ЮЗГУ – 2015 – С. 149–153.

78. 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.

79. Агеев, Е.В. Выбор метода получения порошковых материалов из отходов спеченных твердых сплавов области / Е.В. Агеев, Б.А. Семенихин // Известия Самарского научного центра РАН. – Самара: Изд-во Самарского науч. Ц-ра РАН. – 2009. – Спец. Вып.: Актуальные проблемы машиностроения. – С. 12–15.

80. Агеев, Е.В. Разработка генератора импульсов установки электроэрозионного диспергирования области / Е.В. Агеев, Б.А. Семенихин, Р.А. Латыпов // Информационно-измерительные, диагностические и управляющие системы. Диагностика – 2009: сб. Матер. Междунар. Науч.-техн. Конф.: в 2 ч. – Ч. 2. – Курск, 2009. – С. 144–147.

81. Ageeva, E.V. Morphology and Composition of Copper Electrospark Powder Suitable for Sintering / E.V. Ageeva, N.M. Khor'yakova, E.V. Ageev // Russian Engineering Research, 2015, Vol. 35, No. 1, pp. 33–35.

82. Ageev, E.V. Investigation into the Properties of Electroerosive Powders and Hard Alloy Fabricated from Them by Isostatic Pressing and Sintering / E.V. Ageev, E.V. Ageeva, R.A. Latypov // Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2015, Vol. 56, No. 1, pp. 52–62. © Allerton Press, Inc., 2015.

83. Ageeva, E.V. Nanopowder Produced from High-Speed Steel Waste by Electrospark Dispersion in Water / E.V. Ageeva, E.V. Ageev, V.Yu. Karpenko // Russian Engineering Research, 2015, Vol. 35, No. 3, pp. 189–190.

84. Агеева, Е.В. Оценка износостойкости электроискровых покрытий, полученных с использованием электроэрозионных порошков быстрорежущей стали / Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, А.Ю. Алтухов, В.Ю. Карпенко // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2015. – № 1. – С. 71–76.

85. Агеев, Е.В. Форма и морфология поверхности частиц электроэрозионных порошков микро- и нанометрических фракций, используемых при производстве твердосплавных пластин / Е.В. Агеев, А.В. Киричек, А.Ю. Алтухов // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2014. – № 10. – С. 3–6.

86. Агеева, Е.В. Исследование распределения микрочастиц по размерам в порошках, полученных электроэрозионным диспергированием медных отходов / Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев // Вестник машиностроения. – 2014. – № 9. – С.63-65.

87. Агеева, Е.В. Морфология и элементный состав медных электроэрозионных порошков, пригодных к спеканию / Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев // Вестник машиностроения. – 2014. – № 10. – С.66-68.

88. Ageeva, E.V. Morphology of Copper Powder Produced by Electrospark Dispersion from Waste / E.V. Ageeva, N.M. Khor'yakova, E.V. Ageev //Russian Engineering Research, 2014, Vol. 34, No. 11, pp. 694–696.

89. Агеев, Е.В. Исследование фазового состава электроэрозионного нихрома / Агеев Е.В., Щербаков А.В., С.В. Хардиков, Латыпова Г.Р. // Международный научный журнал. – 2015. – №2. – С. 81–86.

90. Кругляков, О.В. Свойства электроэрозионных порошков, используемых в производстве твердосплавных заготовок / О.В. Кругляков, А.С.Угримов, А.С. Осьминина, Е.В. Агеев // Современные материалы, техника и технологии. – 2015. – № 1. – С. 118–127.

91. Кругляков, О.В. Разработка и исследование твердосплавных изделий из порошков, полученных электроэрозионным диспергированием вольфрамсодержащих отходов / О.В. Кругляков, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева // Известия ЮЗГУ. Серия: Техника и технологии. – 2014. – №. 2. – С. 8–20.

92. Хардиков, С.В. О возможности переработки отходов шарикоподшипниковой стали методом электроэрозионного диспергирования / С.В. Хардиков, Е.В. Агеев, М.А. Зубарев // Современные материалы, техника и технологии. Научно-практический журнал. 2015. – №1 (1). – С. 210–214.

93. Агеева, Е.В. Рентгеноспектральный микроанализ порошка, полученного из отходов быстрорежущей стали электроэрозионным диспергированием в керосине / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, Е.А. Воробьев // Вестник машиностроения. – 2014. – № 11.– С. 71–73.

94. Агеева, Е.В. Свойства синтезированной порошковой быстрорежущей стали из электроэрозионных порошков, полученных в водной среде / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, А.Ю. Алтухов, Д.А. Чумак-Жунь, С.В. Пикалов, В.Ю. Карпенко // Известия ЮЗГУ. – 2015. – № 1 (58). – С. 17-26.

95. Панов, В.С. Исследование влияния способа получения порошка карбида бора и вида пластификатора на формуемость и уплотняемость / В.С. Панов, Ж.В. Еремеева, Е.В. Агеев, О.В. Мякишева, А.И. Лизунов // Известия ЮЗГУ. Серия: Техника и технологии. – 2015. – № 1 (14). – С. 8-12.

96. Агеева, Е.В. Характеристики электроискровых покрытий, полученных электродами из электроэрозионных порошков быстрорежущей стали / Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, В.Ю. Карпенко, А.Ю. Алтухов // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2015. – №.2 – С. 62–66.

97. Агеев, Е.В. Исследование свойств электроэрозионных порошков и твердого сплава, полученного из них изостатическим прессованием и спеканием / Е.В. Агеев, Р.А. Латыпов, Е.В. Агеева // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2014. – № 6. – С. 51-56.

98. Агеева, Е.В. Быстрорежущая сталь, диспергированная в керосине / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, Е.А. Воробьев, М.А. Зубарев // Известия ЮЗГУ. – 2014. – № 5 (56). – С. 21-26.

99. Агеев, Е.В. Электроэрозионное диспергирование шарикоподшипниковой стали до микро- и нанофракций / Е.В. Агеев, А.Ю. Алтухов, С.В. Хардиков, С.В. Пикалов // Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов: матер. XII

100. Агеев, Е.В. Получение твердосплавных пластин с высокими эксплуатационными свойствами из электроэрозионных порошков микро- и нанометрических фракций / Е.В. Агеев, А.В. Киричек, А.Ю. Алтухов, О.В. Кругляков // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2014. – № 12 (213). – С. 3–7.

101. Агеев, Е.В. Упрочнение ножей куттера электроискровым легированием электродами из твердосплавных электроэрозионных порошков / Е.В. Агеев, Р.А. Латыпов, О.В. Кругляков // Труды ГОСНИТИ. – 2014. – т. 116. – С. 156–160.

102. Агеева, Е.В. Исследование микроструктуры и элементного состава твердосплавных пластин, полученных из электроэрозионных порошков микро- и

нанофракций / Е.В. Агеева, О.В. Кругляков, Е.В. Агеев, М.А. Зубарев // Известия ЮЗГУ. Серия: Техника и технологии. – 2015. – № 2 (15). – С. 9-16.

103. Агеева, Е.В. Проведение рентгеноспектрального микроанализа порошка шарикоподшипниковой стали / Агеева Е.В., С.В. Хардиков, Агеев Е.В. // Известия ЮЗГУ. Серия: Техника и технологии. – 2015. – №2 – С. 17–20.

104. Кругляков, О.В. Свойства заготовок твердого сплава, полученных изостатическим прессованием и спеканием электроэрозионных порошков / О.В. Кругляков, А.С. Угримов, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, А.С. Осьминина // Известия ЮЗГУ. – 2015. – № 2 (59). – С. 15-22.

105. Костиков, В.И. Алюмоматричные композиционные материалы, полученные в нестационарном силовом поле и упрочненные наноразмерными добавками / В.И. Костиков, В.Ю. Лопатин, Ж.В. Еремеева, Е.В. Агеев, Н.А. Капуткина, Е.В. Симонова, Ю.Ю. Капланский // Известия ЮЗГУ. – 2015. – № 2 (59). – С. 26-34.

106. Агеев, Е.В. Электроэрозионное диспергирование шарикоподшипниковой стали до микро- и нанофракций / Е.В. Агеев, С.В. Пикалов, С.В. Хардиков, А.Ю. Алтухов // Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов: матер. XII Междунар. конф. / Юго-Зап. гос. ун-т; НИТУ МИСиС. – Курск, 2015. – Ч. 1. – С. 45–50.

107. Агеев, Е.В. Состав, структура и свойства порошка из быстрорежущей стали, полученной электроэрозионным диспергированием в воде / Е.В. Агеев, В.Ю. Карпенко, Р.А. Латыпов // Международный технико-экономический журнал. – 2014. – № 5. – С. 88–96.

108. Агеева, Е.В. Исследование свойств нихромовых электроэрозионных порошков / Е.В. Агеева, А.В. Щербаков, С.В. Хардиков, Е.В. Агеев // Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов: матер. XII Междунар. конф. / Юго-Зап. гос. ун-т; НИТУ МИСиС. – Курск, 2015. – Ч. 1. – С. 32–37.

109. Агеева, Е.В. Разработка оборудования и технологии для получения порошков из отходов вольфрамсодержащих твердых сплавов, пригодных к промышленному использованию / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, Е.А. Воробьев // Вестник машиностроения. – 2015. – № 7.– С. 72–74.

110. Агеев, Е.В. Антифрикационные материалы из электроэрозионных наночастиц быстрорежущей стали / Е.В. Агеев, Е.А. Воробьев // Нанотехнологии: наука и производства. – 2015. – № 2 (34). – С. 68-72.

111. Агеева, Е.В. Исследование микроструктуры и элементного состава изделия из электроэрозионных частиц быстрорежущей стали, полученных в керосине / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, Е.А. Воробьев, А.Н. Семернин, Н.А. Семернин // Механика и технологии. – 2014. – № 4. – С. 6 –12.

112. Панов, С.В. Влияние природы наноразмерных частиц и способа смешивания на трибологические свойства порошковой стали 70П/ В.С. Панов, Ж.В. Еремеева, Г.Х. Шарипзянова, Р.А. Скориков, Г.В. Михеев, Е.В. Агеев // Известия ЮЗГУ. – 2014. – № 6 (57). – С. 8-14.

113. Агеев, Е.В. Элементный состав порошка, полученного электроэрозионным диспергированием сплава ВК8 / Е.В. Агеев, С.С. Гулидин, М.Ю. Арсеенко // Известия ЮЗГУ. Серия: Техника и технологии. – 2015. – №. 3. – С. 8−13.

114. Агеева, Е.В. Исследование гранулометрического состава частиц порошковой шарикоподшипниковой стали, полученной электроэрозионным диспергированием / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, С.В. Хардиков, П.В. Чаплыгин // Известия ЮЗГУ. Серия: Техника и технологии. – 2014. – №4 – С. 23–28..

115. Кругляков, О.В. Исследование микротвердости покрытий, полученных с использованием вольфрамсодержащих электроэрозионных порошков / О.В. Кругляков, А.Д. Сытченко, С.В. Хардиков, Е.В. Агеева // Техника и технологии: пути инновационного развития: сб. тр. 4-ой Междунар. науч.-практ. конф. − Курск, 2014. – С. 173–176.

116. Автомобили: Устройство автотранспортных средств : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / А. Г. Пузанков. – 7-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 560 с

117. Глухов, В.В. Двигатели ОАО "Волжские моторы" для автомобилей УАЗ и "Газель". Издательство "Атласы автомобилей, 2001. – 160 с.

118. Полещук, А.А. и др. Укрупненные нормативы себестоимости восстановления изношенных деталей тракторов двигателей и сельскохозяйственных машин / ГОСНИТИ. – М., 1985. – 19 с.

119. Magnani M. Corrosion and wear studies of Cr3C2NiCr-HVOF coatings sprayed on AA7050 T7 under cooling [Text] / M. Magnani, P.H. Suegama, N. Espallargas, C.S. Fugivara, S. Dosta, J.M. Guilemany, A.V. Benedetti // J. Therm. Spray Techn. - 2009. - Vol. 18(3). – P. 353-363.

Приложение А

Патент на изобретение

4235

11.03.17

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2612117

Способ получения алюминиевого нанопорошка

Патентообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Юго-Западный государственный университет" (ЮЗГУ) (RU)***

Авторы: ***Агеев Евгений Викторович (RU), Новиков Евгений Петрович (RU), Агеева Екатерина Владимировна (RU)***

Заявка № **2015144702**
Приоритет изобретения **19 октября 2015 г.**
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **02 марта 2017 г.**
Срок действия исключительного права на изобретение истекает **19 октября 2035 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Приложение Б

Патент на изобретение

4349 27.08.18г

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2664149

Способ получения мелкокристаллического корунда

Патентообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Юго-Западный государственный университет" (ЮЗГУ) (RU)***

Авторы: ***Новиков Евгений Петрович (RU), Агеев Евгений Викторович (RU), Агеева Екатерина Владимировна (RU), Алтухов Александр Юрьевич (RU)***

Заявка № **2016110004**
Приоритет изобретения **21 марта 2016 г.**
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **15 августа 2018 г.**
Срок действия исключительного права на изобретение истекает **21 марта 2036 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Приложение В

Акт внедрения результатов научно-исследовательской деятельности в учебный процесс

«УТВЕРЖДАЮ»
проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «Юго-Западного
государственного университета»
_____ д.т.н., профессор
О.Г. Локтионова
«01» марта 2019 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс

Материалы научно-исследовательской работы аспиранта кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства Новикова Е.П. «Совершенствование процесса восстановления головок блоков цилиндров из алюминиевых сплавов газодинамическим напылением электроэрозионных материалов» используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» при изучении дисциплины «Технология технического обслуживания и ремонта транспортных и транспортно-технологических машин и оборудования» (3 курс очной формы обучения направления подготовки бакалавров 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», профиль «Автомобильный сервис»).

Начальник учебно-методического управления	_____ (подпись)	В.В. Протасов (Ф.И.О.)
Зав. кафедрой автомобилей и автомобильного хозяйства	_____ (подпись)	А.Ю. Алтухов (Ф.И.О.)
Аспирант кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства	_____ (подпись)	Е.П. Новиков (Ф.И.О.)

Приложение Г

Акт внедрения результатов диссертационного исследования в ООО «ЮЗГУ-ТЕХНО»

Общество с ограниченной ответственностью «ЮЗГУ-ТЕХНО»

ИНН 4632185307, КПП 46320100, ОГРН 1134632015506, БИК 043807708
305040, Курская обл., г. Курск, ул. Студенческая, д. 32, оф. 73

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
_____ А.Ю. Алтухов
«12» февраля 2018 г.

АКТ
о внедрении результатов диссертационного исследования

В рамках совместной научно-исследовательской работы ООО «ЮЗГУ-ТЕХНО» в лице генерального директора А.Ю. Алтухова и ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» в лице д.т.н., процессора Е.В. Агеева и аспиранта Е.П. Новикова была разработана маршрутно-операционная технология, процесса восстановления головок блоков цилиндров автомобильных двигателей газодинамическим напылением электроэрозионными порошковыми материалами.

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 на 13 %;
– адгезионная стойкость возрастает на 20 %;
– коррозионная стойкость увеличивается на 22 %.

От ООО «ЮЗГУ-ТЕХНО»
Старший научный сотрудник _____ Мальнева Ю.А.

От ЮЗГУ:
Руководитель НОЦ «Порошковая металлургия и функциональные покрытия», д.т.н. _____ Агеев Е.В.

Аспирант _____ Новиков Е.П.

Приложение Д

Протокол проведения эксплуатационных испытаний

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор ООО «КСТ»
_____ Корнеенков П.А.
«18» _____07_____ 2017 г.

ПРОТОКОЛ №23-01
установки восстановленных головок блоков цилиндров на двигатели ЗМЗ-406 для проведения эксплуатационных испытаний

1. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Диагностирование и проверка основных параметров головок блоков цилиндров двигателей ЗМЗ-406, восстановленных методом газодинамического напыления с применением электроэрозионных порошковых материалов.

1.2. Установка восстановленных головок блоков цилиндров двигателей ЗМЗ-406 на автомобили марки ГАЗель для проведения эксплуатационных испытаний.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Три головки блока цилиндров двигателей ЗМЗ-406, восстановленных методом газодинамического напыления с применением электроэрозионных порошковых материалов.

3. УСЛОВИЯ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Визуальный осмотр головки блока цилиндра с целью выявления трещин, раковин и следов коррозии с использованием лупы ЛИ-3-10х.

3.2. Испытание на герметичность давлением 0,25-0,30 МПа (2,5-3,0 кгс/см^2) на стенде для опрессовки ГБЦ «УГ1200».

3.3. Проверка коробления привалочной плоскости головки блока цилиндров с использованием линейки ЩП-2-630.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Визуальный осмотр 3-х восстановленных головок блоков цилиндров методом газодинамического напыления с применением электроэрозионных материалов показал, что на плоскости прилегания к блоку цилиндров отсутствуют следы коррозии, а также трещины и раковины.

4.2. Испытание на герметичность 3-х восстановленных головок блоков цилиндров методом газодинамического напыления с применением электроэрозионных материалов при давление 0,25-0,30 МПа (2,5-3,0 кгс/см^2) показали, что все головки блоков цилиндров полностью герметичны.

4.3. В таблице показаны результаты проверки коробления привалочной плоскости головки блока цилиндров с использованием линейки ЩП-2-630.

Головка блока цилиндров №	Размер, мм
1	0,12
2	0,11
3	0,13

5. ВЫВОДЫ

5.1. Диагностирование и проверка основных параметров, головок блоков цилиндров, двигателей ЗМЗ-406, восстановленных методом газодинамического напыления с применением электроэрозионных порошковых материалов показали, что все три головки блоков цилиндров соответствую нормативам технической документации и могут быть установлены на автомобили ГАЗель для проведения эксплуатационных испытаний.

Исполнитель:

Аспирант ФГБОУ ВО «ЮЗГУ» _____ Е.П. Новиков

Ведущие специалисты ООО «КСТ»:

Технолог _____ Морозов А.С.
(должность) (подпись) (Ф.И.О.)

Инженер _____ Долганов Д.П.
(должность) (подпись) (Ф.И.О.)

Приложение Е

Протокол проведения эксплуатационных испытаний

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор ООО «КСТ»
_____ Корнеенков П.А.
«15» _____07_____ 2018 г.

ПРОТОКОЛ № 36-СТ

Снятия и контроля основных параметров, восстановленных головок блоков цилиндров двигателей ЗМЗ-406 после проведения эксплуатационных испытаний

1. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Диагностирование и проверка основных параметров головок блоков цилиндров двигателей ЗМЗ-406, восстановленных методом газодинамического напыления с применением электроэрозионных порошковых материалов после 1 календарного года эксплуатационных испытаний.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Три головки блоков цилиндров двигателей ЗМЗ-406, восстановленных методом газодинамического напыления с применением электроэрозионных порошковых материалов проработавшие на автомобилях ГАЗель 1 календарный год.

3. УСЛОВИЯ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Визуальный осмотр головки блока цилиндра с целью выявления трещин, раковин и следов коррозии с использованием лупы ЛИ-3-10х.

3.2. Испытание на герметичность давлением 0,25-0,30 МПа (2,5-3,0 кгс/см^2) на стенде для опрессовки ГБЦ «УГ1200».

3.3. Проверка коробления привалочной плоскости головки блока цилиндров с использованием линейки ЩП-2-630.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Визуальный осмотр 3-х восстановленных головок блоков цилиндров методом газодинамического напыления с применением электроэрозионных материалов после эксплуатационных испытаний показал, что на плоскости прилегания к блоку цилиндров отсутствуют следы коррозии и раковины. На головках блоков цилиндров №1 и №2 трещины не обнаружены, а в образце №3 присутствует трещина на перемычке между клапанными гнездами длиной 6 мм. Трещина образована не на покрытии, полученном методом газодинамического напыления.

4.2. Испытание на герметичность 3-х восстановленных головок блоков цилиндров методом газодинамического напыления с применением электроэрозионных материалов при давление 0,25-0,30 МПа (2,5-3,0 кгс/см^2)

показали, что две головки блоков цилиндров герметичны, а головка блока цилиндров №3 имеет течь.

4.3. В таблице показаны результаты проверки коробления привалочной плоскости головки блока цилиндров с использованием линейки ЩП-2-630.

Головка блока цилиндров №	Размер, мм
1	0,14
2	0,13
3	0,17

5. ВЫВОДЫ

5.1. Диагностирование и проверка основных параметров головок блоков цилиндров двигателей ЗМЗ-406, восстановленных методом газодинамического напыления с применением электроэрозионных порошковых материалов после 1 календарного года эксплуатации показали, что на всех трех головках блоков цилиндров нарушения газодинамических покрытий не произошло. На всех экспериментальных изделиях не наблюдается следов отслоения газодинамических покрытия, трещин, а также следов коррозии.

На основании этого можно сделать вывод о том, что методом газодинамического напыления с применением электроэрозионных материалов можно восстанавливать дефектные головки блоков цилиндров, причем себестоимость восстановления в 1,5-2 раза ниже, чем себестоимость восстановления промышленно выпускаемыми порошковыми материалами.

Исполнитель:

Аспирант ФГБОУ ВО «ЮЗГУ» _____ Е.П. Новиков

Ведущие специалисты ООО «КСТ»:

Технолог _____ Морозов А.С.
(должность) (подпись) (Ф.И.О.)

Инженер _____ Долганов Д.П.
(должность) (подпись) (Ф.И.О.)