

На правах рукописи



Свиридов Антон Петрович

**РАЗРАБОТКА ПОРОШКОВЫХ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ
ГАЗОДЕТОНАЦИОННОГО НАПЫЛЕНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ
ПОКРЫТИЙ**

Специальность 05.16.06 – порошковая металлургия
и композиционные материалы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Ситников Александр Андреевич

Официальные оппоненты Дудина Дина Владимировна, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория детонационных течений, заведующий лабораторией;

Сапрыкин Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, Юргинский технологический институт (филиал) Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», кафедра «Металлургия черных металлов», заведующий кафедрой.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Защита состоится «20» сентября 2018 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.099.19, созданного на базе Сибирского федерального университета по адресу: 660041, г. Красноярск, проспект Свободный, 82, стр. 6, ауд. 3-17

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета <http://www.sfu-kras.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Карпов Игорь Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

При эксплуатации машины ее детали, узлы и агрегаты так или иначе подвергаются трению и, в дальнейшем – износу. Это приводит к уменьшению эффективности работы трибосопряжений и существенным энергетическим потерям во время эксплуатации. В современной технике необходимо применять более прогрессивные материалы при изготовлении трущихся пар. Это обусловлено ростом удельных нагрузок, которым подвергаются изделия, увеличением скоростей перемещения трибопар друг относительно друга, необходимостью эксплуатации машин в агрессивной среде и при повышенных температурах. В связи с этим достаточно актуален вопрос увеличения надежности трибопар, повышения их долговечности и уменьшения энергозатрат, расходуемых на трения. Потери на трение в современных машинах и оборудовании достигают 30 % потребляемой ими энергии, а расходы на устранение последствий их износа в развитых промышленных странах составляют до 2 % валового национального продукта.

Для снижения затрат на трение разработаны и успешно применяются различные покрытия, начиная от износостойких с керамической основой и заканчивая композиционными на основе металлокерамики. Области их применения достаточно обширны, но при контакте в режиме сухого трения, подобные покрытия обладают высоким коэффициентом трения. Это приводит к значительным энергетическим затратам и нежелательному местному нагреву в области контакта трибосопряжения. Помимо этого, из-за высокого коэффициента трения в этом случае существенно возрастает износ трибопары.

Надежность и долговечность большинства изделий современной техники в значительной степени зависит от работоспособности и срока службы многочисленных узлов трения (трибосистем) различных систем и механизмов машин и их агрегатов. Процессы разрушения деталей машин в подавляющем большинстве случаев начинаются с поверхностных зон. В связи с этим огромную значимость носят работы по разработке принципиально новых антифрикционных материалов, в том числе покрытий с антифрикционными свойствами, которые бы обеспечивали бесперебойную работу тяжело нагруженных изделий.

На наш взгляд, при стремительном развитии автомобильной и гусеничной техники, в том числе и специального назначения, особое внимание стоит уделять разработке антифрикционных покрытий, которые бы способствовали бесперебойной работе всех узлов и агрегатов. Например, особенностью эксплуатации автомобильного двигателя является частое и, в некоторых случаях, резкое изменение скоростного и нагрузочного режимов, поэтому к автомобильным двигателям внутреннего сгорания (ДВС) предъявляются высокие требования. Анализ комплексных потерь энергии в двигателе внутреннего сгорания показывает, что для дальнейшего повы-

шения эффективности использования топлива необходимо максимально снизить потери энергии, обуславливаемые трением, износом и соударением деталей двигателя в процессе его работы.

Сопоставление балансов механических потерь автотракторных ДВС показывает, что наибольшие потери энергии (от 45 до 60 %) происходят в цилиндро-поршневой группе. На поршень двигателя внутреннего сгорания действуют значительные нагрузки – как механические, так и тепловые, например, перезагрузка в процессе работы достигает величин в 1500-2000g, а температура рабочей смеси может составлять 1800-2600 °С. В связи с этим, условия эксплуатации поршня ДВС являются очень сложными.

Исходя из вышеизложенного, разработка новых видов антифрикционных материалов, в том числе покрытий, предназначенных для обеспечения бесперебойной работы тяжело нагруженных деталей, является крайне актуальной задачей.

Актуальность диссертационного исследования определяется необходимостью разработки новых составов для формирования износостойких композиционных покрытий с низким коэффициентом трения, а также установления корреляции между структурой сформированных покрытий и их свойствами.

Актуальность темы диссертации подтверждается также тем, что часть исследований выполнялись в рамках государственного Задания № 11.1085.2017/4.6 на НИОКР Министерства образования и науки Российской Федерации.

Цель и задачи исследования. Целью диссертации является получение алюмоматричных композиционных материалов в порошковой форме для дальнейшего формирования на их основе антифрикционных покрытий тяжело нагруженных изделий газодетонационным способом.

Поставленная цель обусловила необходимость решения следующих задач:

1. Определить технологические режимы получения порошковой алюмоматричной композиционной смеси с углеродными дисперсными структурами и изучить особенности формирования фазового состава и структуры этой композиционной смеси при совместной механоактивационной обработке исходных порошковых материалов.

2. Провести компьютерное моделирование процесса напыления и разработать рекомендации получения газодетонационных покрытий из алюмоматричной композиционной смеси с углеродными структурами.

3. Исследовать физико-механические свойства напыленных покрытий и установить их корреляцию со структурно-фазовым составом алюмоматричной композиционной смеси с углеродными дисперсными структурами.

Основные положения, обладающие научной новизной:

1. Установлено, что для получения механокомпозитов со структурой кристаллической алюминиевой матрицы с равномерно диспергированны-

ми в ней углеродными структурами необходимо использовать не менее 20 % и не более 50 % (об.) С (или C_{60}) при времени механоактивационной обработки не менее 7 минут.

2. В процессе совместной механической активации порошков алюминия и углеродных структур формируются механокомпозиты сложного строения, состоящие из отдельных кристаллитов алюминия и углеродного компонента с характерными размерами до 1-2 мкм, агрегированные в плотные агломераты с размерами до 30-50 мкм, которые при этом объединены в более крупные частицы с размерами до 150-250 мкм.

3. После газодетонационного напыления композиционной смеси состава 70% Al + 30% С + B_4C на подложку из сплава АК21М2,5Н2,5 зафиксировано изменение морфологии основы на глубину вплоть до 0,9 мм. Структура приобретает игольчатый вид с исчезновением крупных частиц первичной фазы. Изменение морфологии подложки приводит к улучшению трибологических характеристик изделия (повышению износостойкости на 15% по сравнению с базовым сплавом, снижение коэффициента трения до 0,015). При напылении состава 70% Al + 30% C_{60} + B_4C изменение структуры основы не наблюдается.

Теоретическая и практическая значимость исследования:

1. Разработаны технологические условия получения алюмоматричной композиционной смеси. Результаты диссертации могут стать основой для проведения дальнейших исследований, направленных на формирование комплексной технологии получения новых материалов конструкционного и функционального назначения.

2. Разработанная алюмоматричная композиционная смесь с различными углеродными дисперсными структурами может использоваться для газодетонационного напыления антифрикционных покрытий поршня дизельного двигателя.

3. Изучены структурно-фазовый состав и антифрикционные свойства покрытий из алюмоматричной композиционной смеси в зависимости от типа используемых углеродных дисперсных структур.

4. Исследовано влияния типа углеродных структур на трибологические характеристики газодетонационных покрытий на основе алюмоматричной композиционной смеси, полученной совместной механической активацией порошков алюминия и углеродных компонентов.

5. Результаты диссертационной работы используются в хозяйственной деятельности АО «Барнаултрансмаш» – специализированного предприятия по конструированию и производству судовых, промышленных, транспортных дизелей.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанные составы алюмоматричных композитов (70% Al + 30% С, 70% Al + 30% C_{60} , 70% Al + 30% С + B_4C , 70% Al + 30% C_{60} + B_4C), которые обеспечивают формирование антифрикционного покрытия газо-

детонационным способом.

2. Результаты формирования фазового состава и структуры порошковой композиционной смеси после совместной механической активации алюминия и углеродных структур (фуллерена, углерода) в зависимости от их типа и концентрации.

3. Результаты формирования фазового состава и структуры покрытий после газодетонационного напыления полученной алюмоматричной композиционной смеси с углеродными дисперсными структурами.

4. Результаты экспериментального исследования механических свойств покрытий и их связи со структурно-фазовым составом.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Обоснованность и достоверность результатов, полученных в диссертационном исследовании, обеспечивается путем проведения экспериментов на современных лабораторных и технологических установках, использованием прецизионного исследовательского оборудования, комплексным анализом структуры и свойств образцов, а также статистической обработкой результатов проведенных экспериментов.

Основные результаты диссертационного исследования докладывались на VI международной научно-технической конференции «Инновации в машиностроении – основа технологического развития России» (г. Барнаул, 2014); I Международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Энергетика. Машиностроение» (г. Новосибирск, 2014); 11-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь - 2014» (г. Барнаул, 2014); VIII Международной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии» (г. Киев, Украина, 2015); Всероссийской молодежной научно-практической школы «Упрочняющие технологии и функциональные покрытия в машиностроении» (г. Кемерово, 2015); международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении» (г. Новосибирск, 2015, 2016); VII Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в машиностроении» (г. Юрга, 2016); молодежной международной научно-практической конференции «Применение нанотехнологий в транспортно-технологическом комплексе» (г. Воронеж, 2016); Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов «Современные транспортные технологии: задачи, проблемы, решения» (г. Челябинск, 2017).

Публикации: результаты диссертационного исследования опубликованы в 16 печатных работах, из которых 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, а также 1 статья в зарубежном журнале, входящем в базу цитирования Scopus, 3 статьи в других изданиях, 8 тезисов доклада на российских и международных конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения,

пяти глав, заключения и списка использованных источников, включающего 152 наименования, приложения. Объем диссертации составляет 171 страница машинописного текста, который содержит 66 рисунков и 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, обозначена научная новизна работы, показаны теоретическая и практическая значимость.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы, в котором представлен анализ состояния вопроса получения антифрикционных покрытий тяжело нагруженных деталей, представлена краткая справка о применяемых антифрикционных покрытиях, способах их создания, а также проведен анализ наиболее проблемных мест в конструкции и материале поршня дизельного двигателя, рассмотрены пути повышения работоспособности поршня. Для получения покрытий из алюмоматричных композиционных материалов, упрочненных дисперсными углеродными структурами, предложен метод совместной механоактивационной обработки исходных материалов с последующим газодетонационным напылением полученных порошков.

Во второй главе приводится обоснование выбора материалов, используемых для получения композиционной смеси с углеродными структурами, дается описание оборудования и методов реализации механической активации, а также описывается аналитическое оборудование и методы исследования, использованные в работе.

В качестве исходных материалов для получения порошковых композиционных смесей использовали порошки алюминия марки АД0, углерода марки ПМ-15, порошкообразную суспензию, состоящую из фуллеренов C_{60} и ультрадисперсных алмазов в определенной пропорции. Дисперсный состав исходных порошков варьировался в пределах 40...100 мкм, фуллерен находился в наноструктурном состоянии (порядка 50 нм). Выбранные компоненты смешивались в необходимых соотношениях. Затем выполнялась операция по механической активации. Применение механоактивации обусловлено необходимостью получения порошковой композиционной смеси для напыления.

Механическую активацию порошковых смесей проводили в планетарной шаровой мельнице АГО-2С с водяным охлаждением при интенсивности размола 400 м/с^2 . Время механоактивации смеси составляло 5...15 минут. Приведенные параметры процесса определялись на основании предварительного анализа.

Порошковые смеси после механической активации, а также напыленные покрытия на основе этих материалов исследовались методами рентге-

нофазового анализа и растровой электронной микроскопии с локальным микроанализом химического состава. Рентгенофазовый анализ образцов проводили с использованием дифрактометров ДРОН-6. Дифрактограммы снимались с шагом сканирования 0,05 градуса и временем экспозиции в каждой точке, равным 3 с. Обработку и анализ экспериментальных данных осуществляли с помощью пакета программ PDWin, предназначенного для автоматизации процесса обработки рентгенограмм.

Напыление образцов осуществлялось газодетонационным способом на подложку из высококремнистого заэвектоидного алюминиевого сплава марки АК21М2,5Н2,5, поскольку данный сплав применяется при изготовлении поршня ДВС. Предварительно подложка подвергалась стандартной операции по пескоструйной обработке. Напыление выполнялось на установке «Катунь-М». Режимы напыления устанавливались исходя из соотношения рабочих газов: а) стехиометрическое соотношение; б) окислительное; в) восстановительное.

Газодетонационное напыление осуществлялось следующими составами, полученными при 7 минутах механоактивационной обработки:

- 1) смесь 70% Al + 30% C₆₀ + В₄С;
- 2) смесь 70% Al + 30% С + В₄С.

Процентное соотношение компонентов было выбрано с учетом ранее выполненных автором исследований, а также по анализу других работ, направленных на создание покрытий из композиционных материалов с дисперсной структурой.

Структуру покрытия изучали с помощью инвертированного оптического микроскопа AxioObserverZ1m, а также на растровом электронном микроскопе EVO 50 XVP фирмы CarlZeiss, снабженном микроанализатором EDS X-Act (OxfordInstruments) с Si-drift детектором. Анализ поверхности газодетонационных покрытий проводился с помощью оптического профилометра-интерферометра Veeco NT 9080 в режиме вертикального сканирования. Износостойкость и антифрикционность напыленных покрытий определяли с использованием машины трения. Критерием износостойкости являлась величина относительного весового износа.

В третьей главе приведены результаты исследования фазового состава и структуры полученной алюмоматричной композиционной порошковой смеси в зависимости от типа и концентрации углеродных дисперсных структур, а также режимов механической активации.

На рисунке 1, а) представлена морфология смеси 90% Al + 10% С (об. %) после 7 минут механоактивационной обработки. Полученный механокомпозит имеет выраженную слоистую структуру, частиц исходной шихты (алюминия и углерода) в составе композиционной порошковой смеси после механической активации не обнаружено. Средний размер получившихся частиц механокомпозита составляет порядка 400 мкм. По среднему размеру полученная фракция является неприемлемой для газодетонационного напыления.

тонационного напыления ввиду неравномерности процесса дозирования (из-за больших размеров частиц композиционной смеси) и, как следствие, невозможности обеспечения получения качественных покрытий.

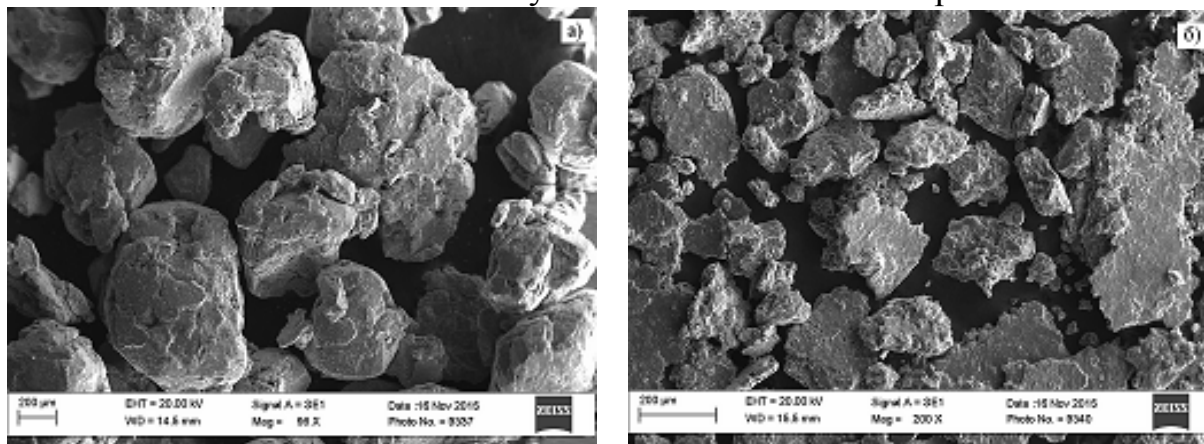


Рисунок 1 – Структура порошковой смеси после 7 минут механоактивационной обработки: а) состав 90% Al + 10% C (об. %), б) состав 70% Al + 30% C (об. %)

При изменении процентного содержания исходных компонентов в сторону увеличения содержания углерода удалось снизить средний размер получаемых частиц до 100 мкм, что является приемлемым для детонационного напыления (рисунок 1, б). При увеличении времени механоактивации до 15 минут качественных изменений в морфологии композиционной смеси не обнаружено, а уменьшение времени механообработки не приводит к образованию композиционной смеси. Таким образом, рациональным временем механоактивации для создания композиционной смеси с точки зрения морфологии следует считать 7 минут (рисунок 1, б).

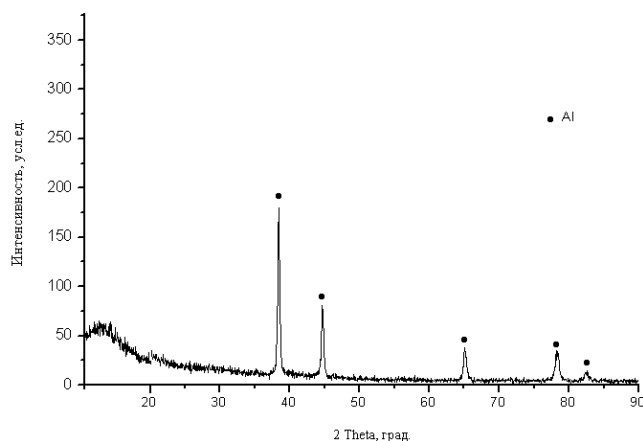
Анализ элементного состава, выполненный энергодисперсионным способом в микроточке и по площади образца, позволяет констатировать, что окисления алюминия в процессе механоактивации не происходит.

На рисунке 2 приведены результаты исследования фазового состава полученной алюмоматричной композиционной смеси после 7 минут механоактивации. В таблице (рис. 2) приведено сравнение параметров экспериментальных и эталонных дифракционных максимумов алюминия (снято на CuK α -излучении, $\lambda=1,5418$ Å). Эталонные значения Al брались по базе данных порошковой дифрактометрии PD Win 3.0.

После механоактивационной обработки порошковой смеси Al+C в течение 7 минут углерод полностью переходит в рентгеноаморфное состояние, о чем свидетельствует наличие аморфного «галло» на малых углах и полностью исчезнувшие пики углерода. Однако растворения углерода в алюминии не происходит (на дифрактограмме узкие симметричные без смещения пики алюминия, параметр решетки сохраняется, что подтверждается данными таблицы на рис. 2), химических соединений также не образуется.

Объяснить исчезновение пиков углерода можно следующим. Алюминий более пластичен, частицы графита чувствительнее к механическим на-

грузкам. Можно предположить, что механоактивированная смесь представляет собой механокомпозит Al-C, представляющий собой слоистую структуру, состоящую из частиц алюминия, на которых распределен тонкий слой рентгеноаморфного углерода (что подтверждается данными электронной микроскопии).



Экспериментальные значения Al		Эталонные значения Al	
2Theta, град.	d, А	2Theta, град.	d, А
38,41	2,343	38,47	2,338
44,68	2,025	44,73	2,024
65,09	1,432	65,13	1,431
78,21	1,222	78,22	1,221
82,41	1,169	82,43	1,169

Рисунок 2 – Дифрактограмма порошковой композиционной смеси состава 70% Al + 30% C (об. %) после 7 минут механоактивации

Помимо аморфизации одним из перспективных способов улучшения функциональных характеристик алмазоподобных покрытий является их легирование карбидообразующими металлами за счет образования в их матрице ультрадисперсных карбидных включений. Использование в качестве карбидообразующих переходных металлов хрома, бора, вольфрама и молибдена при легировании алмазоподобных покрытий должно способствовать высоким противоизносным и антифрикционным свойствам. Поэтому в дальнейшем в состав исходной порошковой смеси дополнительно вводилось некоторое количество карбида бора (порядка 1...1,5 % по объему смеси).

Морфология композиционной смеси с содержанием карбида бора представлена на рисунке 3.

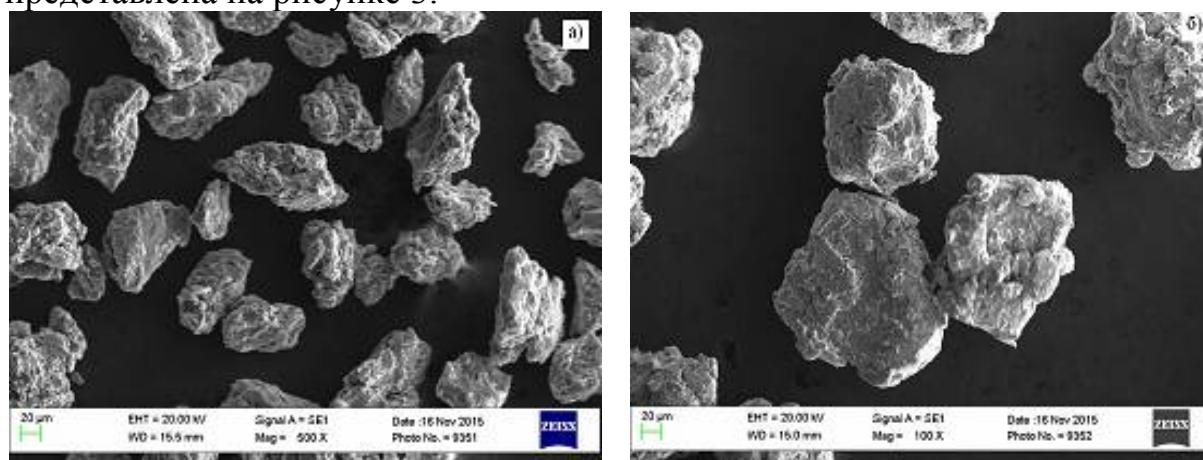


Рисунок 3 – Структура порошковой смеси после 7 минут механоактивации: а) состав 70% Al + 30% C (об. %) + B₄C, б) состав 70% Al + 30% C₆₀ (об. %) + B₄C

Видимых отличий от композиционной смеси без карбида бора не наблюдается, однако с учетом анализа дифрактограмм данные составы целесообразно применять для создания покрытий. Дифрактограммы композиционной порошковой смеси после механической активации представлены на рисунке 4, на которых видно, что карбид бора хорошо способствует аморфизации композиционной порошковой смеси.

В таблице 1 приведено сравнение параметров экспериментальных и эталонных дифракционных максимумов алюминия (снято на CuK α -излучении ($\lambda=1,5418$ А), соответствует рисунку 4). Эталонные значения Al брались по базе данных порошковой дифрактометрии PD Win 3.0.

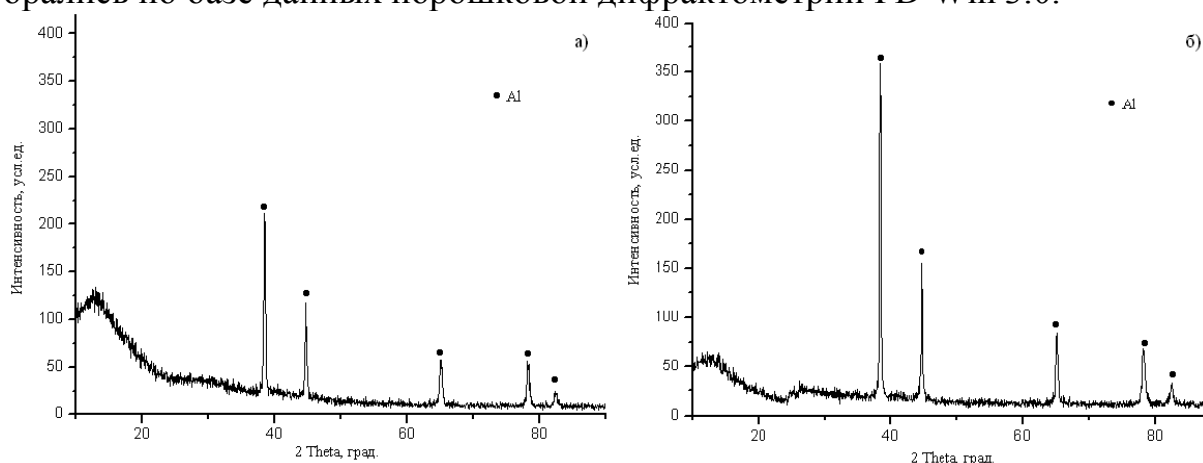


Рисунок 4 – Дифрактограмма порошковой композиционной смеси после 7 минут механической активации: а) состав 70% Al + 30% C₆₀ + B₄C, б) состав 70% Al + 30% C + B₄C

Таблица 1– Сравнение параметров экспериментальных и эталонных дифракционных максимумов Al

(HKL)	Экспериментальные значения Al для состава 70% Al + 30% C ₆₀ + B ₄ C (рис. 4, а)		Экспериментальные значения Al для состава 70% Al + 30% C + B ₄ C (рис. 4, б)		Эталонные значение Al	
	2Theta, град.	d, А	2Theta, град.	d, А	2Theta, град.	d, А
(111)	38,40	2,342	38,42	2,341	38,47	2,338
(200)	44,66	2,027	44,67	2,026	44,73	2,024
(220)	65,10	1,431	65,09	1,432	65,13	1,431
(311)	78,20	1,221	78,18	1,221	78,22	1,221
(222)	82,42	1,169	82,42	1,169	82,43	1,169

Из анализа морфологии и дифрактограмм механокомпозитов, полученных при различных временах механической активации и различного состава, были выделены наиболее перспективные составы для дальнейшего напыления и исследования:

1) состав № 1: композиционная порошковая смесь 70% Al + 30% C₆₀ + B₄C после 7 минут механической активации;

2) состав № 2: композиционная порошковая смесь 70% Al + 30% C + V₄C после 7 минут механической активации.

В четвертой главе приведены результаты моделирования процесса движения двухфазного потока в стволе детонационной установке, результаты фазового состава, структуры и свойств газодетонационных покрытий на основе алюмоматричной композиционной смеси с углеродными дисперсными структурами.

Для установления наиболее рациональных режимов напыления предварительно был поставлен виртуальный эксперимент по процессу движения в камере и стволе установки детонационного напыления двухфазного потока, представляющего собой продукты детонации и частицы порошка, и проведено исследование линий тока частиц порошка. Эксперимент выполнялся с помощью конечно-элементной методики «вычисляемая жидкостная динамика» (ComputationalFluidDynamics– CFD) в программном комплексе AnsysWorkbench. Основным параметром, варьируемым при моделировании процесса детонационно-газового напыления алюмоматричных композитов, являлся гранулометрический состав порошкового материала (0...40 мкм, 40...63 мкм, 63...100 мкм, 100...160 мкм).

Изменение температуры порошковых частиц, полученных при моделировании, представлено на рисунке 5. Приведенные изображения дают представление о температуре частиц алюмоматричной композиционной смеси на срезе ствола установки газо-детонационного напыления.

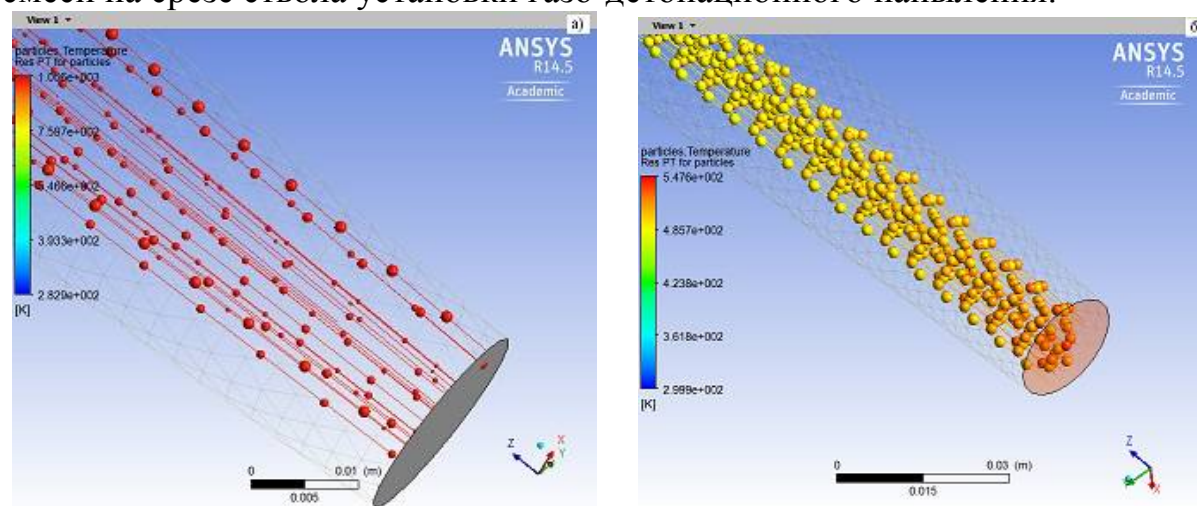


Рисунок 5 – Моделирование изменения температуры частиц в процессе движения в двухфазном потоке в зависимости от размерной группы напыляемого материала: а) размер частиц 0...40 мкм, температура превышает 1000 °С, б) размер частиц 100...160 мкм, температура достигает 540 °С

По результатам моделирования можно сделать вывод, что использовать для газодетонационного напыления порошковые частицы размером менее 40 мкм нецелесообразно из-за практически испарения частиц алюмоматричной смеси во время движения по стволу установки. Данное предположение находит подтверждение и на практике – при напылении порошков фракционного состава меньше 40 мкм скорость роста толщины по-

крытия не значительна.

Результаты моделирования скорости частиц в двухфазном потоке представлены на рисунке 6. Установлено, что средняя скорость частиц на выходе из ствола установки достигает значения порядка 400 м/с.

По результатам моделирования можно предположить, что в случае применения для процесса газодетонационного напыления порошка на основе алюминия дисперсностью 63...100 мкм, скорость двухфазного потока и температура частиц в потоке достигнут наиболее рациональных параметров, которые описываются в литературных источниках.

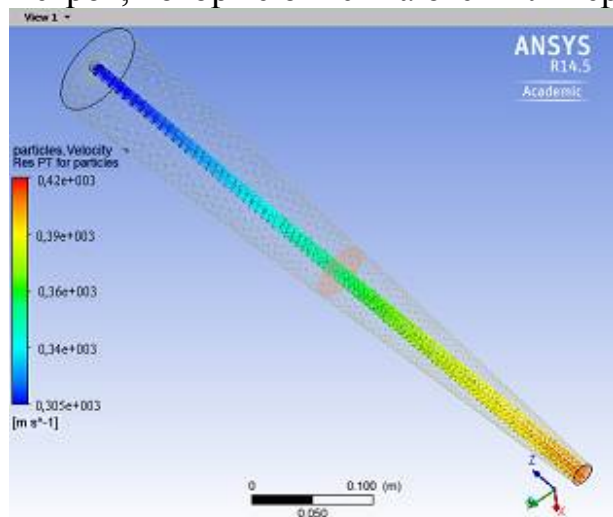


Рисунок 6 – Моделирование изменения скорости частиц алюмоматричного материала в процессе движения в двухфазном потоке, дисперсность частиц 63...100 мкм

После моделирования проведено исследование движения частиц с помощью стенда визуального исследования параметров потока частиц, который обеспечивает возможность непосредственно во время напыления определить скорость частиц. Скорость частиц порошка в процессе напыления измеряли по методике Particle Tracking Velocimetry (PTV, измерение скорости по трекам частицы). При заданных параметрах напыления с помощью PTV-метода выявлена средняя скорость частиц алюмоматричного

материала (400 м/с), которые являются наиболее рациональными для нанесения покрытия из алюмоматричных механокомпозитов. Полученное значение скорости определено при соотношении рабочих газов «50% кислорода – 50% пропан-бутана». Результаты моделирования в среде Ansys Workbench и экспериментального определения скоростей движения частиц алюмоматричного композиционного материала коррелируют друг с другом.

Морфологические исследования показали, что структура исходного образца представляет собой эвтектику, содержащую первичную фазу (предположительно, кремний), равномерно распределённую в алюминиевой матрице. Дендритная структура не проявляется из-за термообработки сплава.

При нанесении методом газодетонационного напыления покрытия первого состава, содержащего 70% Al + 30% C₆₀ + В₄С, в результате интенсивных пластических деформаций в структуре переходной зоны (вблизи границы «покрытие – подложка») происходит выпадение в основном металле дополнительной фазы, имеющей более темный оттенок по сравнению с матрицей (рис. 7, а).

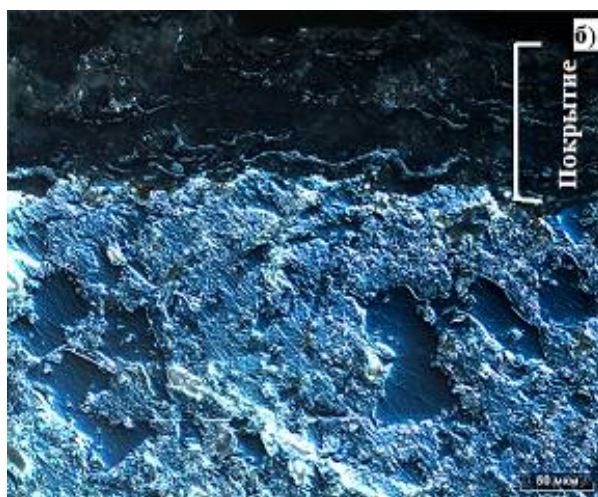
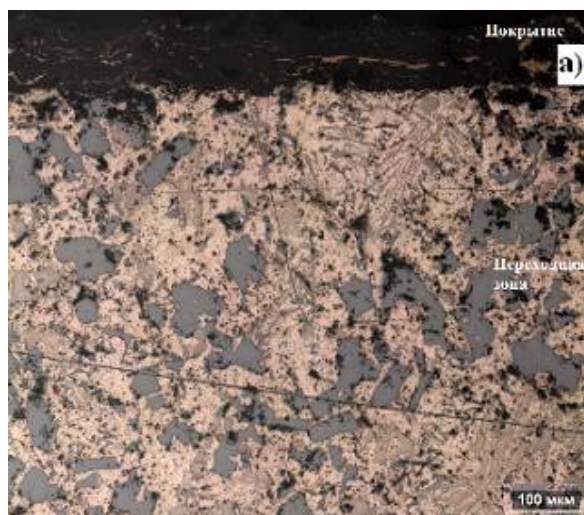


Рисунок 7 – Структура переходной зоны и покрытия образца, напыленного составом 70% Al + 30% C_{60} + V_4C_5 : а) светлое поле, б) круговая поляризация



Рисунок 8 – Структура переходной зоны образца, напыленного составом 70% Al + 30% C + V_4C_5 , светлое поле

Строение дополнительной фазы – преимущественно пластинчатое, однако встречаются и островковые формы в количестве порядка 15%. Само напыленное покрытие имеет характерную для газодетонационного покрытия слоистую структуру со светлыми границами между слоями, содержащими повышенное количество предположительно алюминия (рис. 7, б). Средняя толщина покрытия составляет 85 мкм. При нанесении газодетонационным способом покрытия второго состава, содержащего 70% Al + 30% C + V_4C_5 , в результате интенсивных пластических деформаций происходит переформирование первичной фазы (кремния) – эта фаза приобретает игольчатый вид, крупные кристаллы ее исчезают вплоть до глубины 0,9 мм от поверхности (рис. 8).

На глубине более 0,9 мм от поверхности первичная фаза сохраняется и приобретает вид правильных многоугольников (по сравнению с переходной зоной образца на рис. 7). Строение дополнительной фазы – преимущественно пластинчатое, однако встречаются и ее формы в виде дендритов количестве порядка 4-5%.

Структура непосредственно напыленного покрытия в данном случае обладает менее выраженной слоистостью по сравнению с покрытием, полученным при нанесении состава № 1. Средняя толщина покрытия составляет 65 мкм.

Были проведены исследования морфологии наплавленных покрытий с помощью растрового электронного микроскопа. На рисунке 9, а) представлено покрытие, напыленное составом № 1 (композиционной смесью, содержащей 70% Al + 30% C₆₀ + V₄C, после 7 минут механической активации). Покрытие достаточно однородное, присутствует значительное количество пор, преимущественного размера – 1-3 мкм. Покрытие слоистое, однако, слоистость выражена неярко. Толщина покрытия порядка 110...130 мкм.

Покрытие, напыленное составом 70% Al + 30% C + V₄C, однородное, слоистость выражена не ярко (рисунок 9, б). Однородность покрытия выше, чем в предыдущем случае, пористость незначительная, размер пор не превышает 3 мкм.

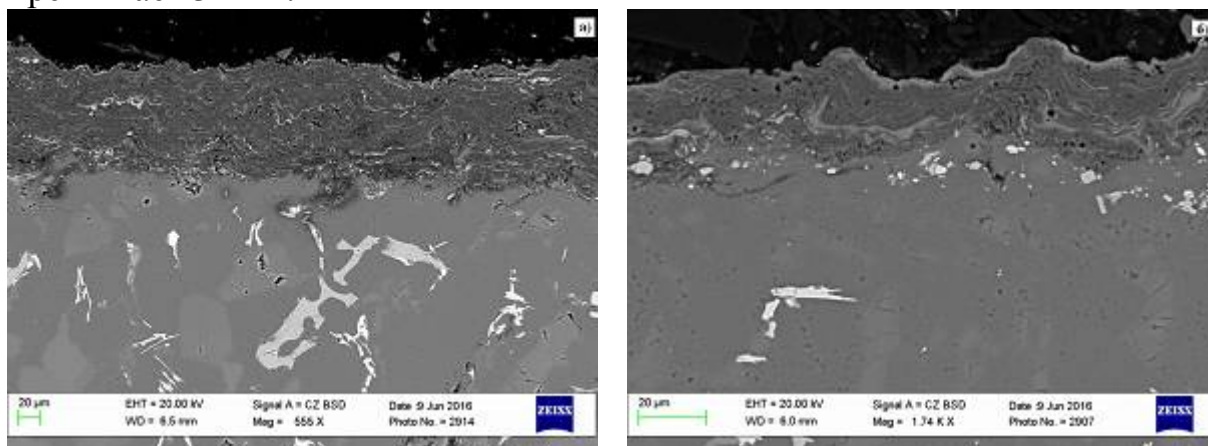


Рисунок 9 – Структура покрытия образца, напыленного составом:
а) 70% Al + 30% C₆₀ + V₄C, б) 70% Al + 30% C + V₄C

Результаты элементного анализа образца с покрытием, напыленного составом 70% Al + 30% C₆₀ + V₄C приведены в таблице на рисунке 10.

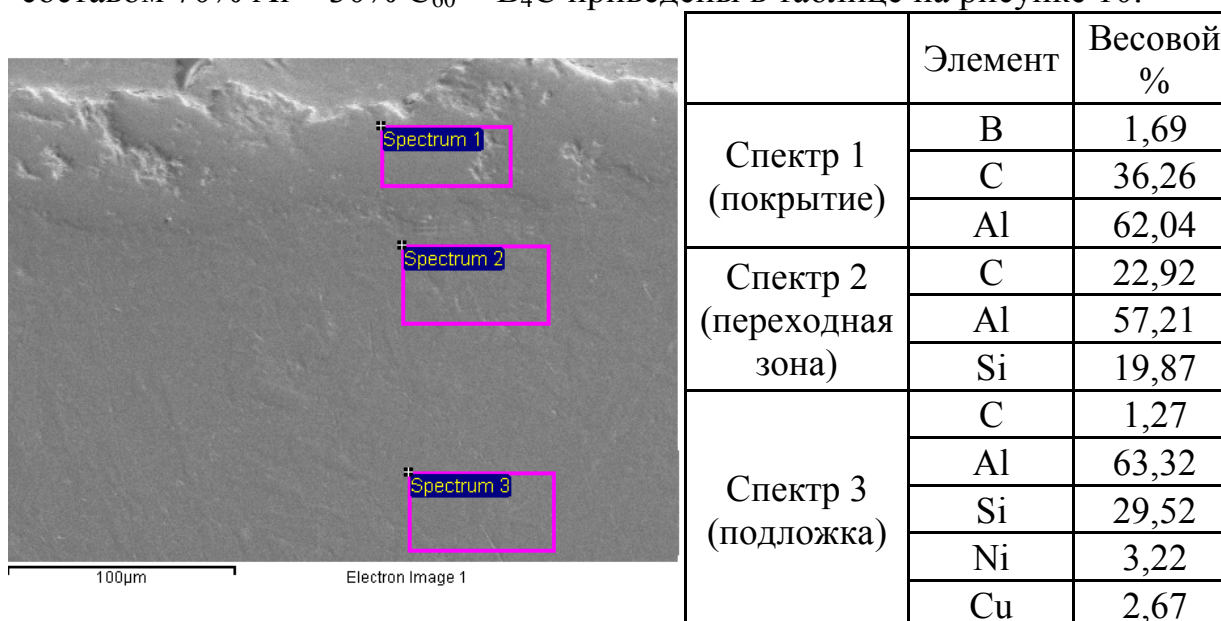
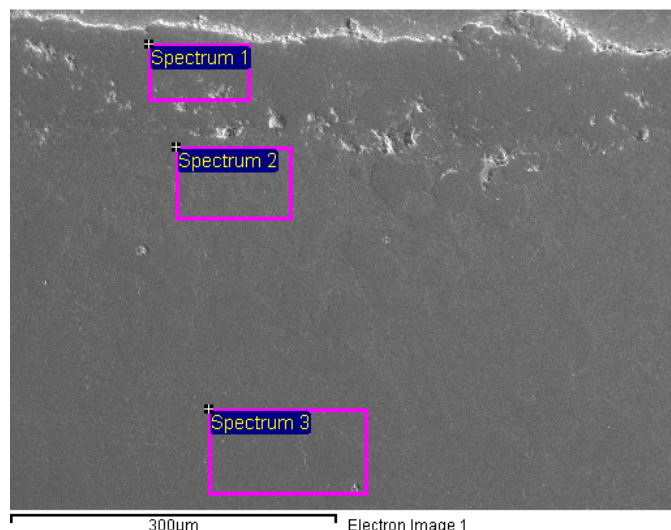


Рисунок 10 – РЭМ-изображение и результаты спектрального анализа образца с покрытием, напыленным составом 70% Al + 30% C₆₀ + V₄C

Аналогичные исследования морфологии образца с покрытием, напы-

ленного составом 70% Al + 30% C + B₄C показали, что в отличие от предыдущего случая происходит диффундирование бора из покрытия в переходную зону (рисунок 11).

Результаты рентгенофазового анализа покрытий приведены на рисунке 12.



	Элемент	Весовой %
Спектр 1 (покрытие)	C	33,87
	Al	66,14
Спектр 2 (переходная зона)	B	10,12
	C	19,77
	Al	59,01
Спектр 3 (подложка)	Si	11,11
	Mg	1,97
	Al	73,66
	Si	16,44
	Ni	3,22
	Cu	4,71

Рисунок 11 – РЭМ-изображение и результаты спектрального анализа образца с покрытием, напыленного составом 70% Al + 30% C + B₄C

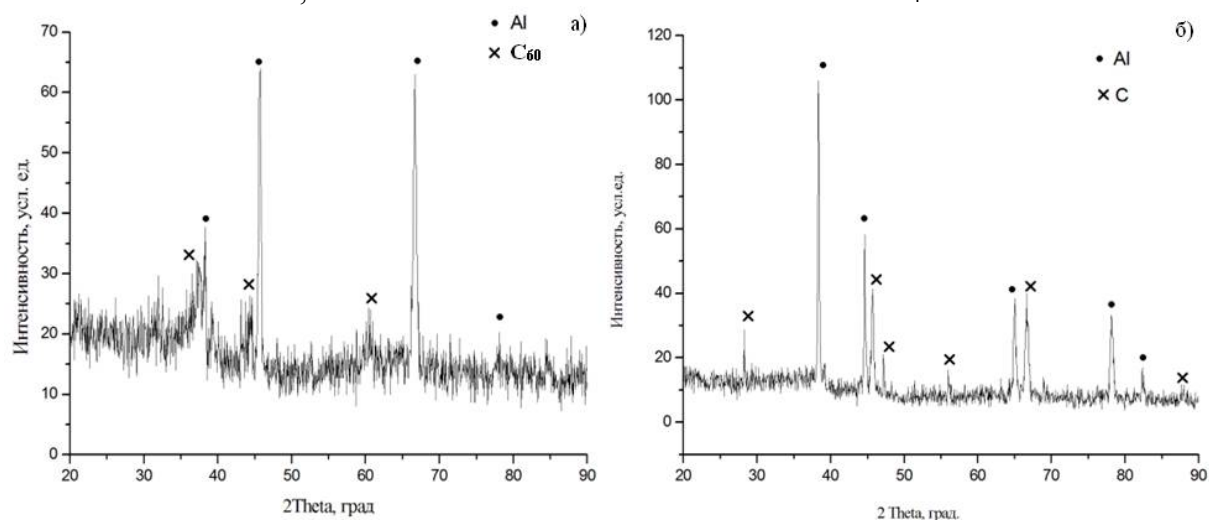


Рисунок 12 – Дифрактограмма покрытия образца, напыленного газодетонационным методом: а) состав 70% Al + 30% C₆₀ + B₄C, б) состав 70% Al + 30% C + B₄C

Как видно из приведенных рентгенограмм покрытий, в процессе газодетонационного напыления углерод и фуллерен восстанавливают свою кристаллическую структуру. Дифрактограммы покрытий являются типичными для покрытий, полученными газовой детонацией, т.е. никаких других фаз, кроме заложенных в композиционную порошковую смесь в покрытие не обнаружено. Углерод и фуллерен, находящиеся в покрытии в кристаллическом состоянии будут способствовать снижению коэффициентов трения поршня дизельного двигателя в процессе его работы, тем са-

мым повысят общий ресурс работы двигателя.

По результатам определения топологии поверхности покрытий с помощью оптического профилометра-интерферометра VEECO (WYKO) NT 9080 можно сделать вывод о наличии выступов и впадин по площади поверхности покрытия. Величина шероховатости составляет от Ra4,16 до Ra 13,94. Результаты определения топологии поверхности полученного покрытия показаны на рисунке 13.

Данные значения шероховатости поверхности поршня ДВС выходят за пределы установленных по технологическому циклу, потому необходимо предусматривать финишную операцию по доводке значений шероховатости до заданных требований в процессе производства поршней ДВС.

В пятой главе приведены результаты триботехнических испытаний и апробация результатов диссертационного исследования.

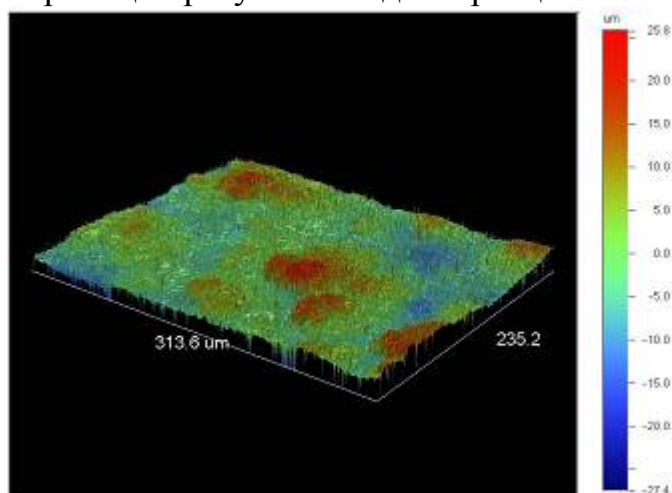


Рисунок 13 – Трехмерная модель шероховатости газодетонационного покрытия состава 70 % Al + 30 % C + В₄C

Триботехнические исследования полученных покрытий проводились с помощью триботехнического комплекса, разработанного на базе машины для испытания материалов на трение 2168 УМТ. Сама машина позволяет проводить исследование материалов различного рода на трение в широком диапазоне схем испытания, действующих нагрузок на образец и скоростей трения.

Исследования антифрикционных и износостойких свойств проводились по схеме «диск-колодка» в сухом режиме при вращательном движении диска. Проводились 2 серии эксперимента: в первой серии на колодку, изготовленную из поршневого сплава АК21М2,5Н2,5, напыляли разработанные составы. Контртело изготавливалось из стали 40. Во второй серии покрытие напылялось, наоборот, на диск, изготовленной также из сплава АК21М2,5Н2,5.

Цикл триботехнических испытаний состоял в предварительной приработке покрытия при скорости 0,9 м/с и нагрузке 1,47 МПа. Затем проводили ступенчатое нагружение до резкого изменения значений момента трения и силы. Условия проведения эксперимента: скорость вращения диска 0,9 м/с; нагрузка на трибопару составляла 6,37...7,35 МПа; испытания продолжались в течение 6 часов.

Степень износа образцов определяли по потере массы в ходе триботехнических испытаний. Перед определением массы образцы промывали для удаления продуктов износа. Затем с помощью макросъемки оценивали об-

ласть локального контакта в трибопаре.

Нагрузить диски с покрытиями дозадира не удалось вплоть до нагрузки 9,8 МПа, в то время как на ролике из поршневого сплава АК21М2,5Н2,5 начинают появляться следы задира при 4,41...4,9 МПа, а при 6,86 МПа наступает схватывание со шлифованной поверхностью колодки.

Графическая зависимость коэффициента трения покрытий от нагрузки показана на рисунке 14. При нагрузке свыше 7,85 МПа образовались локальные очаги схватывания покрытия, полученного в результате напыления композиционной порошковой смеси 70% Al + 30% C₆₀ + В₄С, однако вплоть до нагрузки в 9,81 МПа эффект задира не проявлялся.

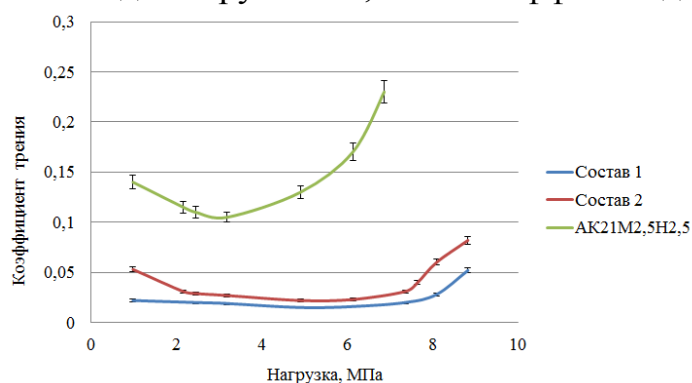


Рисунок 14 – Зависимость коэффициента трения покрытий от нагрузки: Состав 1 – 70% Al + 30% С + В₄С; Состав 2 – 70% Al + 30% С₆₀ + В₄С

Для покрытия состава № 1 (композиционная порошковая смесь 70% Al + 30% С + В₄С после 7 минут механоактивации) коэффициент трения до нагрузки 8,83 МПа не превышает 0,025, а минимальное значение – 0,015 в широком интервале нагрузок от 4,9 до 6,86 МПа.

Коэффициент трения покрытия состава № 2 (композиционная порошковая смесь 70% Al + 30% С₆₀ + В₄С после 7 минут механоактивации) при нагрузках 2,94...6,86 МПа не превышает 0,03, а минимальное значение коэффициента (0,02) достигается при 5,88 МПа. Для покрытия состава № 1 (композиционная порошковая смесь 70% Al + 30% С + В₄С после 7 минут механоактивации) коэффициент трения до нагрузки 8,83 МПа не превышает 0,025, а минимальное значение – 0,015 в широком интервале нагрузок от 4,9 до 6,86 МПа.

Условия трибологических испытаний приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры и результаты трения и износа

Материал диска/покрытия	Условия испытания на износ			Момент трения, Н·м	Коэффициент трения	Нагрузка задира, МПа	Относительная износостойкость, %
	Скорость, м/с	Нагрузка, МПа	Время, ч				
Состав 1	0,9	7,35	6	0,59	0,018	>9,81	95
Состав 2		7,35		2,65	0,035	>9,81	93
АК21М2,5Н2,5		5,37		4,71	0,06	6,96	80

На основании проведенных экспериментов установлено, что трибологические характеристики образцов с разработанными покрытиями намного

превосходят антифрикционные свойства поршневого сплава АК21М2,5Н2,5.

Таким образом, исследования газодетонационных покрытий на основе алюмоматричного композиционного материала, напыленных на алюминиевые поршневые сплавы, показали, что комплекс физико-механических свойств покрытий обеспечивает возможность их использования в качестве антифрикционных и износостойких на поршнях дизелей.

Для осуществления апробации антифрикционных покрытий из алюмоматричного композиционного материала в условиях эксплуатации и работы поршня ДВС было проведено газодетонационное напыление юбки поршня транспортного средства «Поларис». После предшествующей эксплуатации поршни его двигателя были изношены, и необходимо было восстановить необходимые размеры. Для напыления была разработана специальная оснастка, позволяющая, с одной стороны, надежно закрепить поршень в манипуляторе установки газодетонационного напыления, а с другой – обеспечить образование покрытия только в нужных местах (не по всей поверхности изделия).

На один поршень было проведено напыление состава № 1 (композиционная порошковая смесь 70% Al + 30% C + В₄С после 7 минут механоактивации), на другой – состава № 2 (композиционная порошковая смесь 70% Al + 30% С₆₀ + В₄С после 7 минут механоактивации).

После этого был проведен экспресс-тест адгезионных свойств получившихся покрытий с помощью царапанья, который показал удовлетворительные адгезионные качества. Далее поршни с покрытиями подверглись операции шлифования для достижения необходимых показателей по величине шероховатости. После всех операций двигатель «Поларис» был собран, и транспортное средство проходило эксплуатацию в различных условиях в течение 9 месяцев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В ходе выполнения диссертационной работы разработаны и исследованы порошковые композиционные смеси, состоящие из алюминиевой основы с равномерно распределенными в ней углеродными дисперсными структурами: фуллеренами С₆₀ и углеродом. По результатам предварительных исследований наиболее рациональным соотношением компонентов является 70% алюминия (об. %) и 30 % углеродных структур. Рациональное время механической активации составляет 7 минут. Для улучшения антифрикционных и износостойких свойств покрытий к исходным компонентам дополнительно вводили некоторое количество карбида бора (порядка 1...1,5 % по объему смеси). Морфология смесей составов 70% Al + 30% C (об. %) + В₄С и 70% Al + 30% С₆₀ (об. %) + В₄С после 7 минут механоактивационной обработки имеет выраженную слоистую структуру, состоящую из частиц алюминия, на которых распределен тонкий слой

рентгеноаморфного углерода / фуллерена, что подтверждается данными рентгеновской дифрактометрии. Частиц исходной шихты (алюминия и углерода) в составе композиционной порошковой смеси после механической активации не обнаружено. Средний размер получившихся частиц механокомпозита составляет порядка 100...150 мкм. По анализу дифрактограмм выявлено, что карбид бора хорошо способствует аморфизации композиционной порошковой смеси. Исследование элементного состава композиционных порошковых смесей позволяет констатировать, что окисления алюминия в процессе механической обработки не происходит.

2. Результаты моделирования по конечно-элементной методике «вычисляемая жидкостная динамика» (ComputationalFluidDynamics – CFD) в программном комплексе AnsysWorkbench показывают, что в случае применения для процесса газодетонационного напыления порошка на основе алюминия дисперсностью 63...100 мкм, скорость двухфазного потока и температура частиц в потоке достигнут наиболее рациональных параметров, которые описываются в литературных источниках. С помощью стенда визуального исследования параметров потока частиц по методике ParticleTrackingVelocimetry (PTV, измерение скорости по трекам частиц) выявлена средняя скорость частиц алюмоматричного материала (400 м/с) при заданных параметрах напыления, которые являются наиболее рациональными для нанесения покрытия из алюмоматричных механокомпозитивов. Результаты моделирования в программном комплексе AnsysWorkbench и экспериментального определения скоростей движения частиц алюмоматричного композиционного материала коррелируют друг с другом.

3. По результатам оптического и растрового электронного исследования покрытия, напыленного составом 70% Al + 30% C₆₀ + B₄C, установлено, что само покрытие однородное, имеет характерную для газодетонационного покрытия слоистую структуру со светлыми границами между слоями, покрытие довольно однородное, граница раздела «покрытие-материал» четкая, присутствует значительное количество пор, размером преимущественного 1-3 мкм. Толщина покрытия порядка 100 мкм. Аналогичные структурные исследования покрытия, напыленного составом 70% Al + 30% C + B₄C, показали, что покрытие в данном случае обладает менее выраженной слоистостью по сравнению с предыдущим покрытием. Средний размер пор составляет порядка 5 мкм. Граница раздела «покрытие-материал» четкая. Средняя толщина покрытия составляет 80 мкм. Исследования элементного содержания образца с покрытием, напыленного составом 70% Al + 30% C + B₄C, показали, что происходит диффундирование бора из покрытия в переходную зону. При этом, аналогичного диффундирования в образце, напыленном составом 70% Al + 30% C₆₀ + B₄C, не зафиксировано. Дифрактограммы покрытий являются типичными для покрытий, полученными газовой детонацией, т.е. никаких других фаз, кроме

заложенных в композиционную порошковую смесь, в покрытии не обнаружено. Величина шероховатости покрытий составляет от Ra 4,16 до Ra 13,94.

4. Трибологические исследования полученных покрытий проводились по схеме «диск-колодка» в сухом режиме при вращательном движении диска. Нагрузить диски с покрытиями дозадира не удалось вплоть до нагрузки 9,8 МПа, в то время как на ролике из поршневого сплава АК21М2,5Н2,5 начинают появляться следы задира при 4,41...4,9 МПа, а при 6,86 МПа наступает схватывание со шлифованной поверхностью колодки. Коэффициент трения покрытия, напыленного составом 70% Al + 30% C₆₀ + В₄С, при нагрузках 2,94...6,86 МПа не превышает 0,03, а минимальное значение коэффициента (0,02) достигается при 5,88 МПа. Для покрытия, напыленного составом 70% Al + 30% C + В₄С, коэффициент трения до нагрузки 8,83 МПа не превышает 0,025, а минимальное значение – 0,015 в широком интервале нагрузок от 4,9 до 6,86 МПа. Относительная износостойкость покрытия, напыленного порошковой смесью 70% Al + 30% C + В₄С составила 95 %, а для покрытия, полученного составом 70% Al + 30% C₆₀ + В₄С – 93 %. Величина относительной износостойкости для поршневого сплава АК21М2,5Н2,5 составила 80 %. Таким образом, износостойкость и антифрикционные свойства образцов с покрытиями намного превосходят свойства стандартного алюминиевого поршневого сплава, комплекс физико-механических свойств покрытий обеспечивает возможность их использования в качестве антифрикционных и износостойких на поршнях двигателей внутреннего сгорания. С точки зрения проведенных исследований по износостойкости и антифрикционности более предпочтительным для использования в качестве покрытий юбки поршня ДВС является использование состава 70% Al + 30% C + В₄С.

Основные публикации по работе

Статьи в журналах из перечня, рекомендованного ВАК

1. Определение скорости и температуры частиц алюмоматричного композиционного материала в двухфазном детонационно-газовом потоке / А.А. Ситников, А.В. Собачкин, В.И. Яковлев, М.В. Логинова, Н.А. Макарова, А.П. Свиридов // Ползуновский вестник. – 2014. – № 4. – Т.2. – С. 207–210.

2. Особенности формирования покрытий из алюмоматричного углеродсодержащего композиционного материала при газодетонационном напылении / А.В. Собачкин, В.И. Яковлев, А.А. Ситников, М.В. Логинова, С.Г. Иванов, А.П. Свиридов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2015. – Т. 12. – №4. – С. 444–449.

3. Газодетонационные покрытия юбки поршня двигателя внутреннего сгорания на основе алюмоматричного углеродсодержащего композиционного материала / А.В. Собачкин, В.И. Яковлев, А.А. Ситников, М.В.

Логинова, С.Г. Иванов, А.П. Свиридов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – № 7 (139). – С. 34–38.

4. Особенности структурного состояния механокомпозитов на основе алюминия для газодетонационного напыления покрытий / А. А. Ситников, А. В. Собачкин, В. И. Яковлев, М. В. Логинова, А. П. Свиридов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – № 12 (78). – С. 20–25.

Статьи в зарубежных изданиях

5. Evaluation of Wear Resistance of Products on The Basis of Mechanically Activated Materials / A.V. Sobachkin, A.A. Sitnikov, A.P. Sviridov // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – V. 698 – P. 374–377.

Публикации в прочих научных журналах и изданиях

6. Формирование структуры износостойких покрытий с синтезированными в матрице карбидными соединениями при электродуговой наплавке / А.В. Собачкин, А.А. Ситников, В.И. Яковлев, А.П. Свиридов // Инновации в машиностроении – основа технологического развития России : материалы VI международной научно-технической конференции : Часть 2. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2014. – С. 175–179.

7. Оценка износостойкости изделий на основе механоактивированных материалов / А.В. Собачкин, А.А. Ситников, А.П. Свиридов // Электротехника. Энергетика. Машиностроение: в 3 ч. : сборник научных трудов I Международной научной конференции молодых ученых. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – С. 249–252.

8. Алюмоматричные углеродсодержащие композиционные материалы для детонационных покрытий юбки поршня ДВС / А.А. Ситников, А.В. Собачкин, А.П. Свиридов // Горизонты образования. Научно-образовательный журнал АлтГТУ, выпуск 16. – Электронный ресурс. Режим доступа http://edu.secna.ru/media/f/transport_sistem_tez_2014_.pdf

9. Алюмоматричные композиционные материалы, армированные углеродными дисперсными структурами / А.В. Собачкин, В.И. Яковлев, М.В. Логинова, А.А. Ситников, А.П. Свиридов // Сварка и родственные технологии : материалы VIII Международной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов / Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины. – Киев, 2015. – С. 288.

10. Исследование параметров частиц алюмоматричного композиционного материала при газодетонационном напылении / А.В. Собачкин, А.А. Ситников, В.И. Яковлев, А.П. Свиридов, Н.А. Яковлева // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 391–395.

11. Детонационные покрытия на основе алюмоматричного композиционного материала для юбки поршня двигателя внутреннего сгорания / А.В. Собачкин, В.И. Яковлев, А.А. Ситников, М.В. Логинова, С.Г. Иванов,

А.П. Свиридов // Упрочняющие технологии и функциональные покрытия в машиностроении : сборник трудов Всероссийской молодежной научно-практической школы. [Электронный ресурс] / Под ред.: В.Ю. Блюменштейн [и др.]. – Кемерово :КузГТУ, 2015.

12. Триботехнические свойства газодетонационных композиционных покрытий поршня двигателя внутреннего сгорания / А.В. Собачкин, А.А. Ситников, В.И. Яковлев, А.П. Свиридов // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – №3. – С. 152–155.

13. Антифрикционные и износостойкие свойства газодетонационных покрытий из алюмоматричного композиционного материала на поршне двигателя внутреннего сгорания / А.В. Собачкин, В.И. Яковлев, А.П. Свиридов // Инновационные технологии в машиностроении : сборник трудов VII Международной научно-практической конференции / Юргинский технологический институт. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – С. 185–187.

14. Антифрикционные газодетонационные покрытия поршня двигателя внутреннего сгорания на основе наноструктурированного композиционного материала / А.В. Собачкин, А.П. Свиридов, В.И. Яковлев, А.А. Ситников, Р.В. Радионов // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. – 2016. – Т. 3. – № 2 (5). – С. 67–73.

15. Газодетонационное напыление юбки поршня ДВС алюмоматричными композиционными материалами с углеродными структурами / А.В. Собачкин, А.А. Ситников, В.И. Яковлев, А.П. Свиридов // Современные транспортные технологии: задачи, проблемы, решения : сборник трудов Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов. – Челябинск: Полиграф-Мастер, 2017. – С. 74–78.

16. Порошковые алюмоматричные композиты для газодетонационного напыления покрытий / А. В. Собачкин, А. А. Ситников, В. И. Яковлев, А. П. Свиридов // Ползуновский альманах. – 2017. – № 3. – Т.1. – С. 115–119.