

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

На правах рукописи



Свиридов Антон Петрович

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

05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Ситников Александр Андреевич

Барнаул 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
ГЛАВА 1. Состояние вопроса получения антифрикционных покрытий тяжело нагруженных изделий.....	15
1.1 Антифрикционные покрытия	15
1.1.1 Углеродсодержащие покрытия	17
1.1.2 Многофазные нанокпозиционные покрытия.....	22
1.1.3 Твердые смазки	23
1.1.4 Пластичные металлы как твердые смазки	26
1.1.5 Прочие материалы, используемые для создания антифрикционных покрытий.....	27
1.2 Способы создания покрытий с особыми свойствами	30
1.2.1 Физическое газофазное осаждение покрытий.....	30
1.2.2 Химическое газофазное осаждение покрытий	31
1.2.3 Метод наплавки электронными пучками	32
1.2.4 Плазменная наплавка.....	33
1.2.5 Гибридная технология наплавки.....	34
1.2.6 Дуговая наплавка плавящимся и неплавящимся электродом.....	35
1.2.7 Электроискровое легирование	35
1.2.8 Лазерная наплавка	36
1.2.9 Детонационное напыление	37
1.2.10 Плазменное напыление	37
1.2.11 Прочие способы создания покрытий.....	38
1.3 Конструкторские и эксплуатационные особенности поршня двигателя внутреннего сгорания.....	39
1.4 Выводы по главе.....	48
ГЛАВА 2. Материалы и методы исследования	51

2.1 Оборудование для газодетонационного напыления покрытий	51
2.1.1 Сущность способа газодетонационного напыления.....	51
2.1.2 Экспериментальная установка газодетонационного напыления «Катунь М», ее отдельные узлы и системы	57
2.2 Материалы для создания покрытий	65
2.3 Подготовка порошков. Механоактивационная обработка порошковых смесей	66
2.4 Методы исследования порошковой композиционной смеси и покрытий	70
2.4.1 Оптическая микроскопия	70
2.4.2 Растровая электронная микроскопия	71
2.4.3 Рентгенофазовый анализ	72
2.4.4 Износостойкость и антифрикционность	72
2.4.5 Топография поверхности покрытия.....	73
2.4.6 Методика моделирования процесса движения композиционной смеси в двухфазном потоке газодетонационной установки	73
2.5 Выводы по главе.....	74
ГЛАВА 3. Структурные исследования алюмоматричных композиционных материалов с углеродными компонентами.....	76
3.1 Исследование структурного состояния композиционной порошковой смеси состава «алюминий – углерод» после механической активации.....	76
3.2 Исследование структурного состояния композиционной порошковой смеси состава «алюминий – фуллерен» после механической активации	84

3.3 Исследование структурного состояния композиционной порошковой смеси состава «алюминий – углерод/фуллерен – карбид бора» после механической активации	88
3.4 Выводы по главе.....	95
ГЛАВА 4. Газодетонационное напыление алюмоматричных композиционных материалов с углеродными структурами. Морфология и свойства покрытий.....	98
4.1 Моделирование процесса движения напыляемых частиц в стволе установки	98
4.2 Оптическая микроскопия газодетонационных покрытий	114
4.3 Растровый электронный анализ газодетонационных покрытий	118
4.4 Рентгенофазовый анализ покрытий	125
4.5 Анализ поверхности газодетонационных покрытий.....	131
4.6 Выводы по главе.....	133
ГЛАВА 5. Триботехнические испытания и апробация результатов экспериментальных исследований	137
5.1 Исследование антифрикционных и износостойких свойств газодетонационных покрытий.....	137
5.2 Газодетонационное напыление рабочих поверхностей поршня ДВС транспортного средства «Полярис».....	142
5.3 Рекомендации по газодетонационному напылению антифрикционных покрытий поршня ДВС.....	144
5.4 Выводы по главе.....	147
Заключение	149
Список использованных источников	152
Приложение А – Акт внедрения результатов диссертационной работы	172

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

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 подавля-

в большинстве случаев начинаются с поверхностных зон. В связи с этим огромную значимость несут 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 повышения 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.

Степень проработанности темы исследования

Во время работы ДВС наиболее часто встречаемая проблема – износ юбки поршня на нерасчетных режимах (так называемые задиры поршня), особенно в условиях масляного голодания при запуске двигателя.

Один из распространенных способов снижения износа поршня - это применение на юбке особого покрытия Grafal. Основными компонентами покрытия являются графит и особый наполнитель, который предназначен для создания относительно прочного сцепления графитной составляющей с материалом поршня. Покрытие Grafal оказывает значительное положительное влияние на степень износостойкости поршня ДВС, но при этом обладает целым рядом недостатков. К их числу можно отнести возможность задира юбки поршня в некоторых случаях работы двигателя на нерасчетных режимах, к примеру во время запуска или прогрева ДВС (смазка двигателя в этих условиях ухудшена).

В качестве антифрикционных наиболее широкое распространение нашли композиционные материалы с алюминиевой матрицей. Разработке подобных материалов и покрытий на их основе посвящены исследования [1-5], однако работы в этой области далеки от завершения ввиду стремительного развития потребностей современной промышленности. В качестве упрочни-

теля в них используются высокопрочные оксиды, карбиды, нитриды, бориды и т.п. От литейных алюминиевых сплавов алюмоматричные композиты отличаются высокими показателями удельной прочности и жесткости. При этом другие характеристики традиционных сплавов на основе алюминия сохраняются или снижаются незначительно.

Новой тенденцией стало применение в композиционных материалах в качестве упрочнителей наноразмерных частиц. Это обусловлено тем, что при уменьшении размеров материалов до наноуровня они находятся в особом структурном состоянии и начинают проявлять уникальные свойства, не характерные для материалов с макроструктурой и существенно превосходят их в численном значении. Известным и относительно простым способом создания композиционных материалов с наноструктурой являются методы механической активации.

Из возможных упрочнителей для алюмоматричного композита особого внимания заслуживают углеродные компоненты в наноструктурном и ультрадисперсном состоянии, такие как графены, наноалмазы и фуллерены C_{60} . Это обусловлено тем, что использование углеродных структур в составе композита может обеспечить как высокие износостойкие свойства, так и уникальные антифрикционные.

Перспективной технологией, позволяющей наносить разнообразные материалы на поверхности деталей, является детонационно-газовое напыление, к преимуществам которого относится высокая прочность сцепления покрытий с изделием, низкая пористость покрытия и незначительное термическое воздействие на напыляемую металлическую основу.

Таким образом, разработка методов получения алюмоматричных композиционных материалов, упрочненных углеродными компонентами, технологии нанесения покрытий из таких материалов и исследование корреляции структуры покрытия с его свойствами является актуальной задачей, имеющей научную и практическую ценность.

Цели и задачи

Целью диссертации является получение алюмоматричных композиционных материалов в порошковом виде 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.

Научная новизна

1. Установлено, что для получения механокомпозитов со структурой кристаллической алюминиевой матрицы с равномерно диспергированными 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% C + В₄С 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% C₆₀ + В₄С изменение структуры основы не наблюдается.

Теоретическая и практическая значимость работы

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 свой-

ства 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.

Методология и методы исследования

Экспериментальные исследования в ходе проведения диссертационной работы проводились с помощью современных методов анализа и оборудования (оптический инвертированный микроскоп Axio Observer Z1m фирмы Carl Zeiss, растровый электронный микроскоп EVO 50 XVP фирмы Carl Zeiss, дифрактометр рентгеновский общего назначения ДРОН-6, интерферометр-профилометр NT 9080 фирмы Veeco), исследовательских и лабораторных установок с дающими адекватные результаты методиками выполнения экспериментов. Совместную механоактивационную обработку исходных компонентов проводили в планетарной шаровой мельнице-активаторе АГО-2С. Напыление покрытий осуществляли на установке газодетонационного напыления «Катунь-М».

На защиту выносятся:

1. Разработанные составы алюмоматричных композитов (70% Al + 30% C, 70% Al + 30% C₆₀, 70% Al + 30% C + B₄C, 70% Al + 30% C₆₀ + B₄C), которые обеспечивают формирование антифрикционного покрытия газодетонационным 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 Всерос-

сийской 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).

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 всероссийских и международных конференциях.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников, приложений. Работа изложена на 171 странице основного текста, включая 66 рисунков, 11 таблиц. Список литературы состоит из 152 наименований. **Во введении** изложена общая характеристика диссертации, приведено обоснование актуальности темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, приведены положения, выносимые на защиту, описана научная новизна выполненных исследований, ука-

заны теоретическая и практическая значимость диссертации. **В первой главе** диссертационного исследования приведен 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. **Во второй главе** диссертационного исследования приводится обоснование выбора материалов, используемых для получения композиционных материалов, упрочненных углеродными дисперсными структурами, дается описание оборудования и методов реализации механической активации, а также описывается аналитическое оборудование и методы исследования, использованные в работе. **В третьей главе** диссертационной работы приведены результаты экспериментальных исследований фазового состава и структуры полученной алюмоматричной композиционной порошковой смеси в зависимости от типа и концентрации углеродных дисперсных структур, а также режимов механической активации. **В четвертой главе** диссертации 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. **В пятой главе** приведены результаты триботехнических испытаний и апробация результатов диссертационного исследования.

Диссертация рассматривалась 10 октября 2017 г. на расширенном заседании Проблемной научно-исследовательской лаборатории самораспространяющегося высокотемпературного синтеза им. В. В. Евстигнеева федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова».

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПОЛУЧЕНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Материалы относят к антифрикционным (от греч. anti – приставка, обозначающая противодействие, и лат. frictio – трение), если для них характерны следующие свойства: высокая теплопроводность; хорошая смачиваемость смазкой и хорошая прирабатываемость, основанная на способности материала при трении легко пластически деформироваться и увеличивать площадь фактического контакта.

1.1 Антифрикционные покрытия

Актуальной задачей в настоящее время является уменьшение степени износа изделий во время эксплуатации. При работе деталей, узлов и агрегатов машин в достаточно экстремальных условиях (например, при повышенных или, наоборот, очень низких температурах, радиационного излучения, невозможности систематической смазки трибосопряжений) применение жидкой смазки для уменьшения коэффициента трения зачастую крайне не эффективно.

В связи с этим необходимо проводить комплексные исследования по поиску новых антифрикционных материалов, которые улучшают эксплуатационные характеристики изделий. Перспективным способом получения требуемых характеристик детали, работающей в условиях интенсивного трения, является соединение разнородных материалов с отличающимися свойствами в единое изделие, например, путем образования покрытия. При этом, основа изделия изготавливается из материала, подбираемого с учетом необходимых прочностных характеристик и требований к работоспособности конструкции

в целом, а тонкий поверхностный слой формируется из другого материала, обеспечивающего зачастую уникальные свойства.

Поэтому в большинстве случаев нанесенные тонкие покрытия обеспечивают необходимую совокупность эксплуатационных характеристик изделия. В зависимости от цели модифицирования поверхности покрытия могут обеспечить повышение износостойкости детали, увеличение ее твердости, создание химически стойких слоев, изменение оптических характеристик и т.п. Функциональные покрытия условно разделяют на «мягкие» и «твердые». К «мягким» покрытиям относят как твердосмазочные композиции на полимерной основе, так и «мягкие» металлы, природные слоистые материалы типа графита и дихалькогенидов переходных металлов, обладающих пониженным коэффициентом трения, но относительно невысокой износостойкостью. К «твердым» относятся покрытия на основе твердых сплавов, керамик и тугоплавких соединений, которые обладают высокой износостойкостью, но имеют относительно большой коэффициент трения.

Использование покрытий в трибосопряжениях различных деталей, узлов и агрегатов машин является одним из перспективных способов снижения коэффициента трения и уменьшения износа изделий. Помимо основной цели создания покрытий на деталях - повышения срока безаварийной работы - у изделий с покрытиями имеются другие достоинства [6]:

- из-за увеличения износостойких свойств режущего инструмента с покрытиями наблюдается повышение скорости резания, и как следствие, увеличение производительности;

- вследствие снижения коэффициента трения уменьшаются затраты энергии, требуемой на работу механизма; также появляется возможность снизить норму использования (или даже вообще отказаться) смазочно-охлаждающих жидкостей;

- при наличии покрытий в трибопаре снижается схватывание контртел, при обработке резанием снижается налипание обрабатываемого материала на поверхность режущего инструмента и т.п.

1.1.1 Углеродсодержащие покрытия

В качестве одного из компонентов таких покрытий используется какая-либо из форм углерода, наиболее распространенной из которых является графит. Структура графита представляет собой совокупность атомных плоскостей, находящихся в очень слабой химической связи между собой, но при этом, атомы углерода в рамках одной атомной плоскости имеют очень сильную ковалентную связь. Таким образом, ввиду слоистой структуры графит находит применение как антифрикционный материал в различных отраслях машиностроения [7].

Из всех антифрикционных материалов на основе углерода наиболее хорошо изучены алмазоподобные углеродные покрытия (так называемых DLC-покрытий). DLC-покрытия имеют различную структуру и обладают выдающимися трибологическими свойствами и механическими характеристиками [8–15]. Свойства алмазоподобных углеродных покрытий существенно зависят от способа их получения, технологических параметров и концентрации углеродной составляющей.

Например, аморфные углеродсодержащие (a-C) покрытия высокого качества в настоящее время зачастую получают путем вакуумно-дугового испарения с последующим осаждением и фильтрацией [16-21]. Трибологические свойства таких покрытий в основном зависят от характера связей между атомами углерода. Микротвердость нанесенных покрытий лежит в пределах от 50 до 60 ГПа, модуль упругости составляет от 400 до 600 ГПа, а коэффициент трения по стали в режиме сухого трения имеет значение порядка 0,05 – 0,1, и в большой степени зависит от окружающей газовой среды в процессе испытания [8-15]. Эффективность использования a-C покрытия в качестве материала с антифрикционными свойствами заметно уменьшается при по-

вышении температуры эксплуатации из-за перехода sp^3 связей в sp^2 . Такой переход вызывает увеличение коэффициента трения и, как следствие, уменьшение степени износостойкости изделия с покрытием [22-25].

Относительно недавно разработан и успешно применяется новый класс углеродсодержащего материала, который не уступает а-С покрытиями по своим антифрикционным и износостойким свойствам. Таким классом материалов стал аморфный нитрид углерода (CN_x). В качестве покрытий нитрид углерода стал широко использоваться на жестких дисках памяти и практически вытеснил а-С покрытия из этой сферы. Авторами работы [26] также установлена уникальная эластичность нитрида углерода CN_x с фуллереноподобной структурой. Изначально CN_x получали магнетронным распылением [27]. В полученном материале находилось порядка 20 атомных % азота, а сами атомы были связаны в основном по типу sp^2 . Структура материала являлась ярко выраженной пластинчатой. Микротвердость находилась в пределах от 10 до 20 ГПа, а модуль упругости материала составлял порядка 40–120 ГПа. При испытаниях на воздухе был определен коэффициент, который составлял порядка 0,3 [26, 28, 29].

Авторами работы [30] проведено сравнение а-С покрытий и пленок из нитрида углерода, которые были получены вакуумно-дуговым испарением углерода в среде азота. Покрытия а-С были получены дуговым способом, при этом, атомы в покрытии были соединены в основном по типу sp^3 связи [11, 12]. В пленках CN_x , наоборот, установлено наличие значительного количества sp^2 связей, что сигнализирует о нахождении графитовой составляющей в разупорядоченном виде. Исходя из анализа работ [31, 32], данное обстоятельство свидетельствует об образовании своеобразных графитовых кластеров нанометрового размера в аморфной матрице покрытия.

Определение антифрикционных и износостойких свойств этих покрытий в режиме трения скольжения по стали показали, что а-С пленки имеют относительно низкий коэффициент трения (порядка 0,1), тогда как коэффи-

коэффициент трения пленок из нитрида углерода имеет значение порядка 0,3. Данное исследование показало, что наличие азота в покрытии приводит не просто к изменению типа атомных связей и структуры материала, но и оказывает значительное влияние на антифрикционные характеристики.

После определения антифрикционных свойств а-С покрытия на поверхности контртела (стального шарика) установлено наличие графитоподобной пленки, сформированной вероятнее всего из продуктов износа. Образование подобной защитной пленки в результате скольжения контртела по а-С покрытию подтверждается и другими исследователями. Объясняется этот факт фазовым переходом атомных связей из sp^3 в sp^2 вид [16, 32, 33]. В случае испытания пленок из нитрида углерода явных следов продуктов износа на стальном шарике не зафиксировано, а поверхность контртела подвержена ярко выраженному абразивному износу. При замене контртела на шарик из карбида кремния в случае испытаний на воздухе трибологические характеристики покрытий в обоих случаях значительно не поменялись, но в атмосфере инертного газа исследователи зафиксировали значительное уменьшение коэффициента трения до 0,03 – 0,04 в случае испытаний покрытий из нитрида углерода, при этом покрытия из а-С имели коэффициент трения до 0,7. Столь низкий коэффициент трения покрытий из нитрида углерода в паре с шариком из карбида кремния объяснили присутствием значительного количества графитоподобного углерода в аморфном состоянии как на поверхности шарика, так и в продукте износа.

Развитием исследований покрытий на основе нитрида углерода стали многослойные пленки вида C-N/MeN_x. В настоящее время разработаны покрытия C-N/NbN [34-36], C-N/ZrN [37] и C-N/TiN [38, 39], напыленные магнетронным распылением углеродной и металлических (титановой, циркониевой, ниобиевой) мишеней. Например, авторами работы [34] проведены трибологические исследования пленок C-N/ZrN и C-N/NbN с применением в качестве контртела шарика из стали и нитрида кремния. Испытания осуществ-

ляли вплоть до температуры 500 °С. В результате трибологических исследований пленки из C-N/NbN установлено, что коэффициент трения составлял порядка 0,2 и существенно не менялся как при смене контртела, так и изменении. Пленки на основе C-N/ZrN и из C-N/TiN [31] имели коэффициент трения порядка 0,2-0,3.

В работах [40-45] установлено, что добавление углерода в состав пленок из Ti-C-N, Ti-Al-N, Ti-Al-C-N, Ti-Si-C-(N) и Ti-B-C вносит положительный вклад в улучшение антифрикционных свойств покрытий. Например, авторы [40, 41] проводили исследования покрытий на основе Ti-C-N. Установлено, что добавление углерода в состав пленок из нитрида титана приводит к снижению коэффициент трения со значений порядка 0,7...0,8 до 0,25. Исследования антифрикционных свойств покрытий на основе Ti-C-N с помощью стального шарика показали, что с ростом температуры испытания свыше 100°С коэффициент трения увеличивается со значений 0,2 до значений порядка 0,5. Во время аналогичных исследований этих пленок шариком из нитрида кремния установлено, что при температуре 20 °С коэффициент трения имел значения порядка 0,2; при увеличении температуры до 200 °С зафиксировано увеличение коэффициента трения до значений порядка 0,5; при увеличении температуры до 400 °С установлено уменьшение коэффициента трения до значений порядка 0,25.

С учетом положительного влияние кремния на трибологические характеристики покрытия разными авторами осуществлялись исследования по воздействию кремния на антифрикционные характеристики покрытий из Ti-C-(N) [42-44]. Так, авторы работ [42, 43] получали пленки типа Ti-Si-C-N с помощью осаждения газов в реакторе. Установлено, что при увеличении процентного содержания Si в составе покрытия коэффициент трения по стали снижался до значений порядка 0,2.

Авторы работы [43] провели сравнительное исследование антифрикционных характеристик пленок из TiSiN и TiSiCN при разных температурах.

Покрyтия, имеющие в своем составе углерод, имели значительно меньший коэффициент трения как при комнатной температуре (значения коэффициента трения уменьшились с $\sim 0,75$ до $0,35$), так и при повышенной температуре (коэффициент трения снизился с $0,55$ до $0,3$). Авторы объяснили снижение коэффициента трения покрытий Ti-Si-C-N переносом углерода из пленки образца на поверхность контртела. Поэтому, улучшение антифрикционных характеристик пленки из Ti-Si-C-N можно связать с дополнительным вводом углерода в покрытие Ti-Si-N. Из-за этого образуется аморфный углерод, который выполняет роль твердой смазки в зоне контакта. При этом, по причине относительно высоких показателей твердости пленки на основе Ti-Si-C-N зона локального контакта покрытия и контртела при трении очень незначительна. В результате совместного действия этих двух факторов коэффициента трения снижается.

В случае, если во время определения антифрикционных свойств увеличивать температуру проведения испытаний, то образцы с покрытиями обоих типов (как Ti-Si-N, так и Ti-Si-C-N) демонстрируют дальнейшее уменьшение коэффициента трения, что хорошо коррелирует с [44]. Авторами этой работы сделано предположение, что данный эффект связан с формированием дополнительного количества твердой смазки на основе оксидов кремния в зоне локального контакта.

Пленки на базе Ti-Al-N имеют отличные физико-механические свойства, но показывают относительно большой коэффициент трения во время испытаний при комнатной температуре. Авторами работы [41] проведены сравнительные испытания покрытий на базе Ti-Al-N и покрытий на основе Ti-Al-N с дополнительным введением углерода в состав пленки. Установлено, что при добавлении в состав покрытия углерода коэффициент трения уменьшается со значений $0,75$ до $0,25$. При испытании образцов с покрытиями Ti-Al-N первоначально в области контакта образуется трибослой из продуктов износа контртела (стального шарика). Формирование подобного три-

бослая ведет к абразивному износу контртела и, в результате, к большим значениям коэффициента трения. При испытании покрытий на основе Ti-Al-N, легированных углеродом, происходит исключительно абразивный износ материала покрытия.

Таким образом, введение в состав покрытия углерода положительно сказывается на трибологических свойствах поверхности. В качестве еще одним примера такого влияния углерода можно привести работу [45], авторы которой проводили анализ воздействия углерода на антифрикционные свойства покрытий на основе TiB₂. В работы показано, что пленки из TiB₂/C имеют низкий коэффициент трения (порядка 0,2) при применении в качестве контртела шарика из стали 100Cr6. При увеличении температуры испытаний свыше 200 °С коэффициент трения возрастал до 1.

1.1.2 Многофазные композиционные покрытия

В связи с развитием технологий создания покрытий в настоящее время удается формировать нанокоспозиционные покрытия, состоящие из нескольких компонентов. Так, авторы работы [46] получили покрытия на основе Al₂O₃/Au/MoS₂/C с помощью магнетронного напыления, совмещенного с методом лазерной абляции. Данный тип покрытия разрабатывался для эксплуатации при различных условиях, поэтому покрытия испытывались при обычных атмосферных условиях, в среде азота, при высокой концентрации влаги в воздухе, а также при повышенных температурах. В результате испытаний установлено, что для достижения высоких показателей антифрикционных свойств покрытий следует использовать многофазный состав вида (Al₂O₃)_{0,47}(Au)_{0,15}(MoS₂)_{0,24}C_{0,12}. В случае увеличения содержания в покрытии углерода или оксида алюминия повышается значение коэффициента трения, но увеличиваются и износостойкие характеристики пленки. При этом, при увеличении процентного содержания в покрытии более мягкого золота износостойкие свойства напыленного покрытия резко снижаются. Добавление в

состав покрытия дисульфида молибдена приводит к его выделению в трибослое во время испытаний. Кроме фазы MoS_2 в зоне локального контакта формируется пленка из углерода, в результате чего значительно меняется коэффициент трения. Исходя из вышеизложенного, дисульфид молибдена углерод и золото значительно увеличивают антифрикционные свойства образцов с покрытиями, а оксид алюминия придает пленкам необходимую твердость и обеспечивает износостойкость.

Еще одной разработкой многокомпонентных покрытий является работа [47], авторы которой исследовали пленки на основе $\text{Mo}_2\text{N}/\text{MoS}_2/\text{Ag}$, полученные магнетронным напылением. Трибологические характеристики покрытия определяли при трении с шариком из нитрида кремния. Коэффициент трения оставался на уровне (0,4 – 0,6) при испытаниях в условиях комнатной температуры, однако уменьшался до значений порядка 0,3 при увеличении температуры испытаний до 350 °С и достигал 0,1 при температуре 600 °С. Снижение коэффициента трения обуславливалось формированием фаз молибдата серебра, которые обладают низким коэффициентом трения из-за относительно слабого межатомного взаимодействия в системе Ag-O , связи в которой разрушаются во время трения и осуществляется скольжение одних атомных плоскостей по отношению к другим [47].

1.1.3 Твердые смазки

Одной из самых распространенных твердых смазок, нашедшей применения в промышленности, является смазка на основе дисульфида молибдена [48-51]. Из-за строения своей кристаллической решетки в этом материале легко осуществляется перемещение атомных плоскостей по отношению друг к другу, при этом, в рамках одной плоскости атомы связаны сильной ковалентной связью.

В результате многих исследований установлено, что в области локального контакта происходит переориентирование зерен MoS_2 . Пленки дисуль-

фида молибдена, полученные вакуумным осаждением, имеют относительно низкую удельную плотностью и имеют столбчатую структуру [52]. При этом, ориентация атомных плоскостей такова, что они, имея относительно большую поверхностную энергию, в процессе испытания налипают на контртело [53]. Во время проведения испытания происходит частичный износ пленки из дисульфида молибдена, при этом, в дорожках износа образуется трибослой, который способствует сохранению низкого коэффициента трения даже в случае полного изнашивания покрытия [54]. Характерный коэффициент трения при испытании на воздухе для пленок из дисульфида молибдена находится в пределах $0,15 \dots 0,3$ и зависит от структуры покрытия.

В условиях реальной эксплуатации на пленку из MoS_2 адсорбируются водяные пары, что приведет к снижению когезионных свойств покрытия и формированию оксидных составляющих, абразивно разрушающих покрытие из дисульфида молибдена. Однако, частицы оксидных составляющих во время трибологических испытаний, как правило, не налипают на шарик [55]. Для того, чтобы уменьшить адсорбционные процессы водяных паров, увеличивают плотность пленки либо снижают свободную поверхностную энергию [56].

Для снижения коэффициента трения и повышения износостойкости изделия в состав покрытий дополнительно вводят менее 10 ат. % каких-либо металлов. Этот эффект связан (наиболее ярко проявляющийся при добавлении никеля) с повышением плотности покрытия при одновременном увеличении его твердости [57]. Кроме этого, улучшение антифрикционных свойств твердых смазок (например, MoS_2 , WS_2 , MoSe_2 , NbSe_2 и MoTe_2) в случае легирования такими металлами как золото или свинец связано с увеличением межплоскостным расстояний элементарных ячеек, в результате чего скольжение плоскостей друг относительно друга облегчается.

Помимо легирования металлами в состав твердых смазок добавляют углерод, что также повышает антифрикционные характеристики. Комплекс-

ное легирование (углеродом и металлами) снижает диффузию внутрь покрытия, снижая тем самым окислительные процессы в покрытии.

Улучшение трибологических характеристик покрытия можно добиться также путем изменения самой микроструктуры пленки. Например, авторами работы [58] показано, что при добавлении в состав покрытий из MoS_2 оксида сурьмы начинает формироваться многослойная структура, состоящая из наноразмерных слоев дисульфида молибдена и более твердых слоев из оксида сурьмы Sb_2O_3 . Таким образом, в этом случае реализуется эффективный способ повышения антифрикционных характеристик изделия, заключающийся в получении покрытий с чередующимися слоями твердых и антифрикционных компонентов.

В настоящее время разработаны и исследованы покрытия на основе Ti-MoS_2 [59, 60], TiN-MoS_2 [61, 62], Ti-SiN-MoS_x [63], $\text{TiB}_2\text{-MoS}_2$ [64] и другие. Из двухслойных покрытий следует упомянуть о системах WSe_x/TiC , $\text{WSe}_x/\text{Ti-C-N}$ и $\text{WSe}_x/\text{Ti-Si-N}$. В этих покрытиях верхний слой представляет собой наноразмерные фазы nc-WSe_2 и $\text{nc-W}_3\text{O}$, которые относительно равномерно распределены по аморфной матрице из a-WSe_x [65]. Трибологические характеристики покрытий отличает низкий коэффициент трения, значения которого находятся на уровне 0,015...0,07. При этом, в отличие от пленок из дисульфида молибдена, двухслойные наноразмерные покрытия не требуют приработки трибосопряжений ввиду стабильности коэффициента трения уже на этом этапе [66].

Среди многослойных антифрикционных покрытий также следует отметить композиционные нанослойные покрытия на основе Ti-Cr-B-N/WSe_x с варьирующимся количеством фазы WSe_x [67]. Эти пленки при незначительном содержании WSe_x (порядка 5%) имели структуру, схожую с морфологией покрытий на основе Ti-Cr-B-N , а при увеличении процентного содержания мягкой фазы WSe_x до 10% структура претерпевает значительные изменения: зерна измельчаются вероятно из-за возрастания объемной доли аморфной

фазы. Коэффициент трения пленок на основе Ti-Cr-B-N/WSe_x уменьшался по мере увеличения содержания в составе покрытия вольфрама и селена. Так, при добавлении в покрытие 10 ат% WSe_x коэффициент трения имеет значение порядка 0,2, что в 2,5 раза меньше, чем у исходного покрытия на основе Ti-Cr-B-N. Износостойкие свойства покрытий обоих составов (Ti-Cr-B-N и Ti-Cr-B-N/WSe_x) оставались примерно на одном уровне.

1.1.4 Пластичные металлы как твердые смазки

Наиболее комплексно исследовано применение в качестве антифрикционных материалов использование серебра и золота. В первую очередь это связано с практически полным сохранением физико-механических свойств этих металлов вне зависимости от окружающей среды и действующих температур. В качестве тонких пленок на поверхности изделия эти металлы нашли применение в рентгеновских трубках и в узлах аппаратов аэрокосмической техники, поскольку могут эксплуатироваться долгие годы в глубоком вакууме без потери своих антифрикционных свойств.

Авторами работы [68] установлено, что пленки из мягких металлов, таких как золото и серебро, нанесенные поверх относительно твердых материалов, приводят к снижению сдвиговых нагрузок в процессе трения, в то время как материал основы хорошо воспринимает нормальные нагрузки, играя роль демпфера. Таким образом, эти покрытия, сочетающие в себе мягкие и твердые слои, имеют существенно более низкий коэффициент трения, чем твердые однослойные покрытия [69, 70]. При этом, исследователи установили оптимальную толщину мягкого слоя, который необходимо нанести на твердое покрытие. Толщина слоя мягкого металла зависит от исходной шероховатости подложки и составляет порядка 300...1000 нм. В случае увеличения мягкого слоя свыше 1000 нм нормальная составляющая нагрузки рас-

пределялась по поверхности из мягкого металла, в результате чего мягкие слои покрытия вдавливались. В случае выдерживания оптимальной толщины мягкой пленки коэффициента трения имел значения порядка 0,2...0,4 [69, 71].

При формировании антифрикционных покрытий на основе серебра еще одним достоинством является тот факт, что из-за нерастворимости Ag в решетках нитридов и карбидов металлов происходит измельчение микроструктуры напыляемого покрытия, в силу чего улучшаются его механические характеристики. Авторы работ [72, 73] тщательно исследовали механизмы формирования трибослоя в пленках состава CrN – 22 % Ag, напыляемых способом магнетронного распыления. Определение антифрикционных характеристик покрытий по схеме «диск – колодка» с контртелом из оксида алюминия показало корреляцию коэффициента трения от температуры основы во время отжига после напыления и от температуры непосредственно испытания. В случае, если разности этих температур хватает для диффундирования серебра к поверхности покрытия, то из-за образования трибослоя из серебра в процессе испытания значения коэффициента трения снижаются до величин до 0,16...0,24.

В работе [74] исследовали возможность применения золота в качестве составляющей для создания покрытий с антифрикционными свойствами. Пленки на базе системы «алюминий-золото» получали магнетронным осаждением. В результате трибологических испытаний при использовании в качестве контртела шарика из оксида алюминия установлено, что коэффициент трения таких покрытий достигает значений порядка 0,4 – 0,5.

1.1.5 Прочие материалы, используемые для создания антифрикционных покрытий

В качестве перспективных материалов для теплозащитных и каталитических покрытий предлагают оксидную керамику и медьсодержащие сплавы,

например, корунд и алюминиевую бронзу. Соответствующие покрытия из предлагаемых материалов получают газотермическими методами.

В ряде работ [75-79] проанализированы результаты исследований повышения мощности дизелей, оснащенных поршнями с керамическим покрытием, которые подтвердили экспериментально повышение эффективности ДВС при работе с поршнями с теплоизолирующим корундовым слоем.

Масштабное применение нанотехнологий в последние годы позволило проводить материаловедческий дизайн композиционных материалов, т.е. конструировать и изучать их, на уровне отдельных атомов или кластеров. Многими исследователями замечено, что при снижении характерных размеров частиц до наноуровня материалы начинают проявлять специфические механические, тепловые, электрические свойства, обусловленные наличием в подобных материалах особой структуры. При этом, сравнивая аналогичные свойства у макро- и даже микро материалов, установлено, наноматериалы имеют существенно превосходящие характеристики. Поэтому, перспективой развития направления работ по композиционным материалам, может стать отрасль получения новых материалов – наноструктурированных порошков, которые будут в основе будут иметь матрицу из одного материала с равномерно распределенными в ней наночастицами другого элемента.

Эффективность применения таких композиционных материалов на основе алюминиевой матрицы в большинстве случаев будет определяться выбором того или иного элемента в качестве наноразмерных упрочняющих частиц, а также технологией и способом получения уже объемного изделия, которые бы обеспечивали сохранение упрочняющих частиц в наноструктурном состоянии, гарантируя тем самым хорошие физико-механические свойства изделия в целом.

В настоящее время одним из самых распространенных и технологичных способов получения наноструктурных композиционных материалов является порошковая металлургия. Преимущества данной технологии заклю-

чаются в возможности эффективного регулирования основных характеристик композиционных материалов: в первую очередь, структуры и фазового состава, а следовательно, и свойств изделия. Подобная возможность варьирования обусловлена широким диапазоном параметров получения композитов, а также изменением концентрации или типа упрочнителей.

В качестве возможных упрочнителей, вводимых в матрицу композиционного материала, используют различные частицы в наноразмерном виде: оксиды, нитриды, карбиды и т.п. Однако, особое внимание в последнее время уделяется наночастицам на основе углерода: графены, фуллерены C_{60} , наноалмазы и другие. Исследованию свойств этих наноматериалов посвящено большое количество работ: ученые выявили, что данные наночастицы имеют высокие значения электро-и теплопроводности, обладают сверхупругостью, отличаются рекордными показателями прочности, которые в некоторых случаях приближается к теоретической прочности. В случае сохранения этих свойств в композиционном материале можно быть получить изделие с уникальным комплексом свойств.

Поскольку углеродные дисперсные частицы в исходном состоянии представляют собой нанопорошки, то при их использовании в качестве упрочнителей в композиционных материалах возникают достаточно сложные задачи их гомогенного распределения в матрице.

Технологией, позволяющей решить задачу равномерного распределения частиц упрочнителя в объеме матрицы, является процесс механической активационной обработки порошковых материалов [80, 81]. В основе технологии лежит использование шаровых планетарных мельниц-активаторов. Кинетика механической активации, измельчения и других сопутствующих процессов в твердом веществе протекает в достаточно ограниченном временном интервале – исключительно в момент соударения частиц друг с другом или мелющим телом и еще определенное время после соударения (во время релаксации возникших в частице напряжений).

Механические напряжения в частицах, которые возникают при их соударении с другими частицами или мелющими телами, вызывают определенное возбуждение кристаллической решетки частиц, а релаксация этих напряжений, предположительно, вызывает нарушение упорядоченной изначальной структуры. За время исследования особенностей воздействия механической активации установлено, что во время интенсивного механического воздействия наступает момент, после которого разрушение (измельчение) частиц прекращается, а изменение структурных параметров и термодинамических характеристик этих частиц может продолжаться. Выявлено, что энергия, образующаяся из-за ударного воздействия мелющих тел на частицы, расходуется как на их нагрев, так и на формирование в порошковом материале различного рода дефектов. Поскольку во время механической активации ударное воздействие мелющих тел на частицы повторяется многократно, то в планетарных активаторах создаются условия, позволяющие накапливать дефекты кристаллической решетки, тем самым увеличивая накопленную энергию.

1.2 Способы создания покрытий с особыми свойствами

Для нанесения покрытий с антифрикционными свойствами, а также для дополнительного введения в них каких-либо элементов в настоящее время используются следующие способы.

1.2.1 Физическое газофазное осаждение покрытий

Физическое газофазное осаждение (physical vapor deposition, PVD) представляет собой совокупность способов формирования пленок в вакууме, в которых они наносятся в результате конденсации из газа, получаемого при испарении или распылении материала мишени. PVD-методы основаны на физическом эффекте испарения или распыления материала катода в вакуум-

ную камеру с дальнейшей подачей какого-либо реакционного газа (азота, кислорода, CN_4 и др.) в нее. Благодаря плазмохимическому взаимодействию реакционного газа и ионизированного потока плазмы на подложке происходит конденсация покрытия.

Среди методов наибольшее распространение получили: вакуумно-дуговая конденсация материала с ионной бомбардировкой, магнетронное распыление и ионное плакирование (нанесение слоя термомеханическим способом).

Относительно высокая скорость осаждения и возможность широкого варьирования составов напыляемого материала сочетаются в методике PVD с относительно простой конструкцией и легкостью в применении магнетронных систем, что и обуславливает широкое распространение этих методов при получении покрытий [82]. Магнетрон представляет собой устройство с распыляемым катодом, в котором используется разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях. В качестве источника атомов углерода при получении алмазоподобных покрытий используются, как правило, графитовые катоды. Комбинация электромагнитных полей позволяет удерживать электроны, образуя электростатические ловушки, за счет чего достигается замкнутость траекторий их движения, благодаря чему увеличивается плотность плазменного разряда и достигается непрерывный режим работы напылительного оборудования с плоскопараллельными электродами [83, 84]. Это позволяет достигать высоких скоростей распыления покрытий (десятки мкм/ч) при достаточно небольших показателях давления рабочих газов (порядка 0,1 Па). При этом, скорость напыления при магнетронном распылении в 50...100 раз больше в сравнении с диодным напылением или распылением ионного пучком. Такая скорость достигается за счет более высокой плотности ионного тока, достигаемой благодаря локализации плазмы у поверхностных слоев мишени при помощи сильного магнитного поля.

1.2.2 Химическое газофазное осаждение покрытий

Процесс химического газофазного осаждения (chemical vapour deposition, CVD) состоит из химической реакции в газовой фазе, которая протекает над поверхностью изделия, и благодаря которой на подложку осаждается конечный продукт реакции.

Все CVD-методы создания алмазоподобных пленок требуют применения плазменно-ассистированной активации исходного углеродсодержащего материала. К ним можно отнести термический метод (к примеру, с помощью горячей проволоочной нитью), плазменный способ (с помощью плазмы тлеющего разряда, СВЧ-плазмы или высокочастотной плазмы), использование плазменного горения (плазменные горелки) [85].

При нанесении алмазоподобных покрытий, как правило, температура подложки поддерживается в диапазоне 1000...1400 К. Образующиеся покрытия проявляют поликристаллическую структуру, меняющуюся в зависимости от конкретных условий получения. Скорость напыления и прироста толщины покрытия меняется в зависимости от способа осаждения, при этом увеличение скорости напыления может быть получено исключительно в результате потери качества покрытия. Способы напыления алмазных и алмазоподобных пленок в результате сжигания углеводородов относительно непродолжительны и приводят к быстрому росту толщины покрытия (порядка 100–1000 мкм/ч), однако покрытие в этих случаях увеличивается в каких-либо локальных зонах, что ведет к формированию покрытия низкого качества.

1.2.3 Метод наплавки электронными пучками

С помощью наплавки электронным лучом (ЭЛН) на поршне удается сформировать равномерные по толщине слои наплавленного металла, при этом основной металл подвергается минимальному проплавлению. Адгезионные свойства наплавленных с помощью электронного луча покрытий

находятся на уровне металлических связей, в связи с этим, случаи их отслаивания или растрескивания под воздействием интенсивных нагрузений достаточно редки [86].

В случае использования электронных пучков достаточно низких энергий (порядка 5 кэВ), из-за сочетания преимуществ вакуумной защиты ванны расплавленного металла и применения порошковых материалов, метод позволяет получать упрочненные слои (на поверхностях различных деталей дизелей) с высоким уровнем физико-механических свойств [87-90].

Также достоинством метода электроннолучевой наплавки является возможность многократной наплавки после перешлифовки уже ранее восстановленных деталей.

Среди недостатков данной технологии можно отметить необходимость применения электронно-лучевых камер. Это влечет за собой требование тщательной подготовки деталей перед наплавкой, например, их очистку от загрязнений. При этом, необходимость создания вакуума существенно уменьшает производительность процесса электроннолучевой наплавки.

1.2.4 Плазменная наплавка

Технология нанесения покрытия плазменной наплавкой, основанная на нанесении наплавочного слоя на основной металл с помощью плазменной горелки, оборудования для подвода плазмообразующего газа, защитного газа и охлаждающую воду. Плазмообразующими газами могут служить аргон, азот, кислород. В качестве защитного газа, способствующего улучшению формирования наплавленного металла и уменьшению разбрызгивания, может использоваться аргон, азот, углекислый газ либо воздух. Для наплавки применяют материалы – порошки кремнистые, марганцевые, керамические, присадочные проволоки из цветных и черных металлов [91]. Плазменная горелка состоит из корпуса и сопла. В верхней части горелки находится электрод. В начале процесса напряжение подается на электрод, зажигается дежурная ду-

га, которая отключается при зажигании дуги между электродом и изделием. На электрод подается «минус» на изделие «плюс». Дежурная дуга создает ионизацию плазмообразующего газа.

Процессы плазменной наплавки, в основном применяемые при ремонте, можно разбить на две основные группы, рассматривающие способы введения наплавочного материала [92, 93]. Первая группа – это способы, основанные на применении присадочного материала в виде порошка, которые могут осуществляться по трём типам: по слою крупнозернистого порошка, заранее насыпанного на наплавляемую поверхность, а плазменная дуга прямого действия расплавляет его; с подачей порошка в сварочную ванну; вдуванием порошка в дугу с плавлением его в этой дуге и переносом на поверхность детали, заранее подогретую и оплавленную дугой прямого действия. Подача порошка осуществляется транспортирующим газом под давлением, который затем участвует в плазменном процессе. Ко второй можно отнести способы, основанные на применении расплавлении присадочной проволокой, переходящей на наплавляемую поверхность изделия в виде капель, а в случае необходимости использования больших токов – в виде струи. В этом случае поверхность подложки необходимо нагревать до температуры, сравнимой с температурой плавления используемого присадочного материала [94].

Тем не менее, при наплавке массивных деталей теплоты, переносимой на поверхность подложки жидким присадочным материалом не всегда достаточно. Применение плазменной наплавки создает повышение коррозионной стойкости. Также требуется последующая механическая обработка (обтачивание), что в свою очередь незначительно увеличивает усталость металла.

1.2.5 Гибридная технология наплавки

Еще одним направлением в области повышения стойкости и срока службы деталей является т.н. гибридная технология [95] – лазерно-дуговая наплавка. В этом случае лазерный луч воздействует на изделие совместно с

электрической дугой, возникающей между изделием и плавящимся электродом. Применение дугового источника может существенно (как минимум в 2 раза) уменьшить необходимую для расплавления изделия мощность лазерного луча [13 91], а лазерное излучение, в свою очередь, обеспечивает возможность сжатия электрической дуги для создания кинжального проплавления. Данная технология используется в основном для устранения различных дефектов литых изделий, а также при ремонте различного рода трещин в корпусах механизмов и машин либо при восстановлении деталей, изношенных в процессе эксплуатации. Основное достоинство метода – его высокая производительность из-за значительных скоростей процесса наплавки [95-97].

1.2.6 Дуговая наплавка плавящимся и неплавящимся электродом

При обычном способе дуговой наплавки существует целый ряд проблем: происходит интенсивное разбрызгивание электродного металла, в результате чего в наплавленном металле образуется повышенная пористость; для качественного соединения необходимо обеспечить предварительную разделку кромок в теле изделия; в результате интенсивного теплового воздействия дуговой наплавки на основу формируется крупнозернистая структура наплавленного металла, что зачастую приводит к снижению износостойкости упрочненных поверхностей.

Указанные проблемы решает технология двухдуговой наплавки с использованием как неплавящегося, так и плавящегося электродов одновременно. Данный способ был разработан в Институте электросварки им. Е. О. Патона [98, 99] и заключается в поочередном и раздельном формировании дуг, возникающими между изделием и плавящимся и неплавящимся электродом при образовании совместной сварочной ванны. Подобное применение дуг исключает их электромагнитное взаимодействие, в результате чего обеспечивается интенсивное перемешивание расплавленного металла сварочной ванны и происходит ее дегазация. В результате, при использовании разрабо-

танной технологии наплавленный металл имеет мелкозернистую структуру, а также обеспечивается равномерное распределение упрочняющих интерметаллидных фаз по всему наплавленному слою.

1.2.7 Электроискровое легирование

Технология электроискрового легирования (ЭИЛ), основанная на явлении полярного переноса материала анода (электрода) на изделие (катод) в результате импульсного протекания разрядов в газовой среде. Особенностями процесса является возможность формирования слоев с большим диапазоном физико-химических свойств, варьируя электрическими режимами. В том числе материалами электродов можно изменять структуру и фазовый состав формируемых слоев. Для слоя легирования применяют ванадий, цирконий, алюминий, карбиды молибдена и вольфрама. ЭИЛ создает повышение твердости, коррозионной стойкости, триботехнических характеристик. Недостатком является высокая шероховатость нанесенного слоя, которая при самых «мягких» режимах достигает $3,2 \text{ Ra}$. Также нестационарные процессы нагрева в зоне импульсного разряда являются причиной появления в слоях остаточных растягивающих напряжений, что влечет снижение усталостной прочности.

1.2.8 Лазерная наплавка

Технология нанесения покрытия лазерной наплавкой основана на расплвлении наплавочного материала на основной металл с применением лазерного луча – высококонцентрированного источника нагрева. Необходимость такой технологии возникает при наплавке разнородных металлов. С этой точки зрения перспективно применение лазерного луча, который позволяет обеспечить точную дозировку энергии, вводимой в металл, отдельно регу-

лизовать нагрев и плавление основного и присадочного материалов, а также свести к минимуму перемешивание [97].

Процессы лазерной наплавки покрытий можно разделить на две основные группы, рассматривающие способы введения наплавочного материала в зону воздействия излучения. Первая группа – это способы, основанные на плавлении предварительно размещенного наплавочного материала на поверхности обрабатываемого изделия. В качестве наплавочного материала применяют прутки, ленты. Ко второй можно отнести способы, при которых наплавочный материал подается в зону воздействия излучения непосредственно в процессе обработки.

Однако применение такой технологии требует дорогостоящего оборудования. Покрытия создают повышение коррозионной стойкости и триботехнических характеристик. В случаях при применении соответствующих наплавляемых материалов незначительно повышается усталостную прочность

1.2.9 Детонационное напыление

Детонационные покрытия успешно применяются в машиностроении, авиационной промышленности [100-102]. Перед вышеуказанными, этот метод обладает рядом преимуществ [102]:

- высокая адгезионная прочность покрытий;
- низкая пористость;
- незначительное термическое воздействие на напыляемую металлическую основу;
- относительная простота и высокая надежность технологического оборудования для напыления покрытий;

При движении детонационной волны по стволу установки газодетонационного напыления ее скорость может достигнуть значений порядка 3000 м/с, при этом температура во фронте волны составляет 3600 К. Варьируя со-

отношение горючих газов, место ввода порошка в ствол установки, фракционный состав и массовую навеску напыляемого порошка, можно обеспечить регулирование скоростей напыляемых частиц на срезе ствола установки напыления в диапазоне от 200 до 1200 м/с [102].

1.2.10 Плазменное напыление

Среди различных способов нанесения покрытий, плазменное напыление привлекает к себе особое внимание. Плазменное напыление является логическим развитием электродуговой металлизации. Используя плазму, которая является высокоэнтальпийным и высокоскоростным источником нагрева, удастся сформировать покрытия практически из всех известных материалов. Свойства покрытий зависят от технологических параметров напыления.

В частности процесс плазменного напыления состоит из следующих стадий:

1. Образование диспергированных активных частиц в плазменной струе, формируемой плазматроном с использованием среды воздуха для плазмообразующего газа.

2. Транспортирование напыляемого материала. Процесс доставки материала к подложке функционально связан с характеристиками первой стадии, но и имеет особенности связанные с физическими свойствами среды, через которую он осуществляется (давление, температура, дистанция напыления), а также физико-химических свойств напыляемого материала.

3. Формирование покрытия. Процесс начинается с момента удара частицы поверхность. В зависимости от скорости движения напыляемого материала, размера, удельного веса, а также сочетания физических свойств подложки и напыляемого материала происходит формирование покрытия.

1.2.11 Прочие способы создания покрытий

Для формирования покрытий могут применяться и другие способы, например, метод электролитического осаждения, метод диффузионного насыщения и др. При использовании этих способов дается напылить на поверхности изделия покрытия, сочетающие в себе хорошие физико-механические и эксплуатационные свойства. Эти методы напыления имеют характерные особенности, такие как минимальный нагрев изделия (а в результате отсутствие изменения геометрических параметров детали), высокое качество напыленного покрытия, возможность формирования многослойных и многокомпонентных пленок разного состава.

Исходя из проведенного обзора, можно сделать вывод о перспективности газодетонационного метода напыления покрытий [102]. Также способ детонационного напыления позволяет практически полностью устранить минусы электролитических способов получения покрытий и диффузионной металлизации, таких как большая длительность процесса получения покрытий, невысокую толщину покрытия (порядка нескольких микрометров); плазменного напыления, газоплазменной наплавки, при которой происходит деформация обрабатываемой детали в результате интенсивного нагрева. Детонационные покрытия отличаются от покрытий, полученных другими способами, высокой твердостью, износо-, жаро- и эрозионной стойкостью, что определяет их перспективность.

1.3 Конструкторские и эксплуатационные особенности поршня двигателя внутреннего сгорания

В мире существует несколько фирм, целенаправленно занимающихся разработкой конструкций и технологий изготовления поршней двигателя, но наибольшую известность по праву получила немецкая марка «Мале» (Mahle) [103].

Фирма Mahle существует с 1920 года. Сегодня Mahle - это целая группа специализированных компаний, которая так и именуется - Mahle Group. Так,

производством поршней, цилиндров и блоков цилиндров занимается концерн Mahle GmbH, привлечший дочерние и долевые фирмы США, Мексики, Бразилии, Испании, Франции и Южной Кореи. Туда же входят известные фирмы Mondial Piston (Испания) и Konig KG GmbH (Австрия). Помимо этого, в группу Mahle входят компании, производящие детали двигателей, включая поршневые пальцы, клапаны и др., а также фильтры (в том числе известная фирма Knecht).

Фирма Mahle приобрела свою мировую известность в основном успехами в разработке и производстве поршней для двигателей всех типов - от маленьких мотоциклетных до мощных, в десятки тысяч киловатт, судовых дизелей. Особенности конструкции и технологии изготовления поршней, выпускавшихся фирмой Mahle, - это этапы развития не только самой фирмы, но и всего мирового моторостроения. Они интересны для всех любителей техники, но особенно для тех, кто так или иначе связан с ремонтом автомобильных двигателей.

Известно, что поршни автомобильных двигателей изготавливаются из легких алюминиевых сплавов [2 99]. Mahle первой в Европе освоила серийное производство поршней из сплава алюминия с кремнием (1926 г.). При этом специальные поршневые сплавы «Mahle 124» с 11 - 13% кремния (1933 г.) и «Mahle 138» с 17 - 19% кремния (1937 г.) стали классическими для производителей поршней и сегодня применяются не менее широко.

В 1935 году Mahle впервые начала выпуск поршней со специальным профилем наружной поверхности: вместо цилиндрической формы поршень приобрел овальную и бочкообразную. Такая конфигурация оптимальна, поскольку в реальных условиях овальный и бочкообразный поршень, нагреваясь неравномерно (температура днища, омываемого горячими газами, существенно больше температуры юбки, охлаждаемой при контакте со стенками цилиндра), принимает форму, близкую к цилиндрической. В то же время небольшое заужение нижней части юбки создает гидродинамический эффект

Дальнейшее развитие поршней - конструкция Duotherm, применяемая в основном на бензиновых двигателях с 1970 года. Здесь «управление» тепловым расширением юбки осуществляется как с помощью биметаллического эффекта, так и расширением верхней части поршня. Вследствие этого схема Duotherm по тепловому расширению лучше предыдущих схем, но несколько уступает по прочности схеме Autothermatik.

В последние годы поршни без стальных вставок и пазов (с «жесткой» юбкой) снова оказались в центре внимания. Автомобильные двигатели последнего поколения, многие из которых имеют алюминиевый блок цилиндров, потребовали облегчения поршней без ухудшения их тепловых, прочностных и других эксплуатационных характеристик. Это оказалось возможным, если перейти на материалы с повышенным содержанием кремния (включая сплав «Mahle 244» с 23 - 26% кремния). Одновременно были разработаны более эффективные методы получения заготовок поршней, в частности вместо литья под давлением - штамповкой (ковкой) и «жидкой» штамповкой. В результате поршни двигателей последних моделей имеют достаточно простую форму, низкую массу, высокую прочность и износостойкость, обеспечивая при этом минимальный шум двигателя.

Особо следует остановиться на конструкции поршней для дизельных двигателей. Как известно, дизель характеризуется очень высокой степенью сжатия (до 22 - 24 против 9 - 10 у бензинового двигателя) и соответственно большими силовыми и тепловыми нагрузками на детали, включая поршень. Его совершенствование опять-таки хорошо иллюстрируется цепочкой разработок фирмы Mahle.

Еще в 1931 году Mahle впервые применила чугунную вставку канавки для верхнего кольца, что позволило заметно увеличить ресурс дизельного двигателя. Эта конструкция с успехом применяется и по сей день, хотя с 1974 года (а особенно в последнее время) для упрочнения верхней канавки все чаще применяют износостойкие покрытия.

Обычно такое покрытие имеет толщину 40 - 120 мкм и делается по всему днищу поршня с «заходом» в канавку верхнего кольца, одновременно защищая края днища поршня от перегрева. В данном случае покрытие получают по технологии твердого анодирования, то есть термохимическое преобразование верхнего слоя алюминиевого сплава в твердую керамику (окись алюминия Al_2O_3) [107]. Кстати, подобное покрытие, но меньшей толщины (обычно 10 - 15 мкм), используют и на поршнях высокофорсированных бензиновых двигателей с наддувом. Здесь помимо уменьшения износа верхней канавки ставится цель защиты днища поршня от разрушения детонацией.

В поршнях современных дизелей с наддувом нередко применяют так называемое внутреннее охлаждение, которое уменьшает температуру днища на 30 - 80°C. Оно состоит в подаче масла из системы смазки через форсунку во внутреннюю кольцевую полость поршня, расположенную около пояса поршневых колец. Очевидно, что изготовление поршня с подобным кольцевым отверстием требует специальной технологии.

Кроме этих особенностей, в последних конструкциях автомобильных дизелей с непосредственным впрыском топлива в цилиндр, отличающихся очень высокой нагрузкой на поршень, появилась и другая особенность. В бо-бышках поршня здесь устанавливают бронзовые втулки в отверстия для поршневого пальца, а сам палец делают волнистым с плавным уменьшением диаметра на 10 - 40 мкм вблизи краев отверстий поршня и шатуна. Такие решения обеспечивают долговечность соединения поршня с пальцем там, где традиционные конструкции и материалы уже не работают [108].

Среди достижений фирмы, касающихся дизелей, нельзя не отметить поршни с армированием керамическими волокнами типа Liquostatik, а также поршни типа Ferrotherm, состоящие из двух частей - уплотняющей и направляющей. На подходе и другие новинки.

Большинство поршней традиционно покрывается тонким (порядка 5 мкм) слоем свинца, олова или цинка. Покрытие препятствует задиру юбки на

нерасчетных режимах, например при запуске и прогреве, когда условия смазки ухудшены. В последние годы на юбку поршней стали наносить покрытие типа Grafal, которое представляет собой графит со специальным наполнителем, обеспечивающим прочное сцепление со стенкой юбки. Покрытие имеет толщину 15 - 30 мкм и существенно влияет на износостойкость поршня [109].

Для V-образных двигателей с алюминиевыми блоками цилиндров и их поршней фирма разработала специальные технологии и материалы. Так, поршни имеют покрытие типа Ferrostan (1975 г.), представляющее собой слой железа толщиной 12 - 20 мкм, покрытый сверху тонким (1 - 2 мкм) слоем олова [110-113]. Блок цилиндров отливают по специальной технологии Silumal из алюминиевого сплава «Mahle 147» (17% кремния, 4% меди) с осаждением повышенного количества кремния вблизи цилиндров. После обработки поверхность цилиндров травят соляной кислотой, при этом алюминий «уходит» с поверхности и там остается чистый кремний. Таким образом, пара материалов в двигателях с такими блоками цилиндров как бы обратна привычной: «железный» поршень работает в «алюминиевом» цилиндре. Этим достигается исключительная износостойкость пары (в комплекте с хромированными поршневыми кольцами), а также низкий уровень шума из-за очень малого зазора в цилиндре (порядка 0,01 мм). Такие блоки теперь применяют самые именитые фирмы (V8 - «Мерседес», «Ауди», «Порше»; V12 - «Мерседес» и БМВ).

Следует упомянуть также успехи Mahle в создании специальных износостойких покрытий цилиндров, в частности Chromal (1951) и Nikasil (1967) [114]. Chromal - это хромовое покрытие толщиной 0,06 - 0,08 мм, осаждаемое электрохимическим способом на алюминиевый цилиндр. Nikasil состоит из никеля с включением мелких (размером около 3 мкм) частиц карбида кремния; такое покрытие имеет наивысшую износостойкость. Это определило использование алюминиевых гильз цилиндров с покрытием Nikasil для двигателей гоночных автомобилей.

Здесь уместно заметить, что Mahle - основной производитель поршней и гильз цилиндров для автомобилей «Формулы 1» (F1). Подавляющее большинство команд, включая Феррари, Вильямс - Рено, Бенеттон-Рено, МакЛарен - Мерседес и другие, использует именно эти комплектующие. Поршень двигателя F1 должен оставаться работоспособным при частоте вращения до 17000 мин^{-1} , поэтому он отличается предельно низкой массой и малой высотой, изготавливается «жидкой» штамповкой и имеет, как правило, внутреннее охлаждение, причем на последних модификациях используют только два поршневых кольца.

Сегодня фирма Mahle выпускает поршневые группы (комплекты «поршень - поршневые кольца - поршневой палец») для подавляющего большинства моделей и модификаций автомобилей европейского производства. Перечень марок впечатляет: «Мерседес», БМВ, «Фольксваген», «Ауди», «Опель», «Рено», «Пежо», «Ситроен», «Фиат» и многие другие. Эта продукция Mahle идет как для конвейерной сборки, так и в запасные части. Достаточно велика номенклатура поршней и для двигателей японских машин. Не забыты российские потребители: фирмой Mahle освоены и уже продаются на нашем рынке поршневые группы и кольца для двигателей ВАЗ и ГАЗ.

Несмотря на огромную массу выпускаемых деталей (в последние годы к ним прибавились поршневые кольца и подшипники коленчатых валов), фирма выполняет и индивидуальные заказы. Например, здесь могут изготовить поршни для новых двигателей в единичных количествах. Имея серьезную исследовательскую, конструкторскую и производственную базу, Mahle может спроектировать и сделать поршень для любого двигателя, удовлетворяющий всем необходимым требованиям, будь то низкий расход топлива и масла, малый выброс токсичных веществ с выхлопными газами, невысокий шум, максимально возможные мощность и долговечность двигателя. При этом будут выбраны оптимальные сочетания материала, конструкции, гео-

метрии и покрытий поршня, необходимые для выполнения поставленных условий.

Конструктивно поршень состоит из двух укрупненных блоков (рисунок 1.1): головка 1 и юбка 2 [110, 115]. Элементами головки поршня является днище 3 и два специальных пояса: огневой 4 и уплотняющий 5. Юбка поршня ДВС в свою очередь включает направляющую часть и бобышки 6.

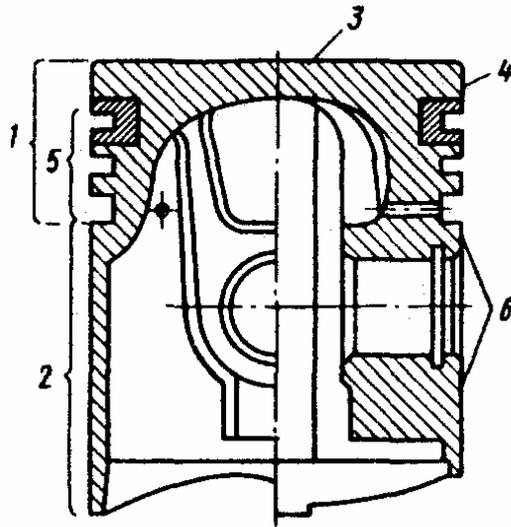
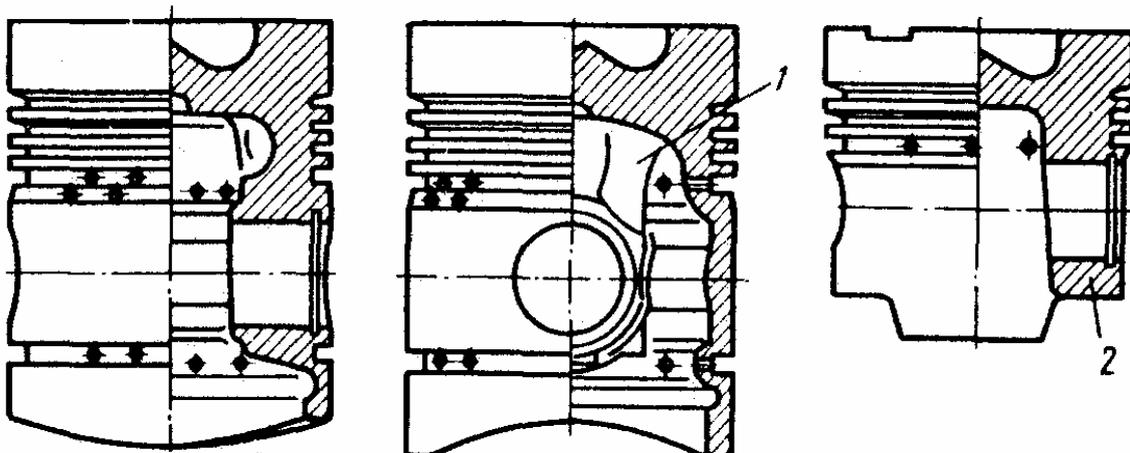


Рисунок 1.1 – Конструктивные элементы поршня

Безусловно, за время развития автомобилестроения конструкция поршня претерпевала различные изменения: на рисунке 1.2 приведены примеры существующих конструкций поршня ДВС [111, 115].



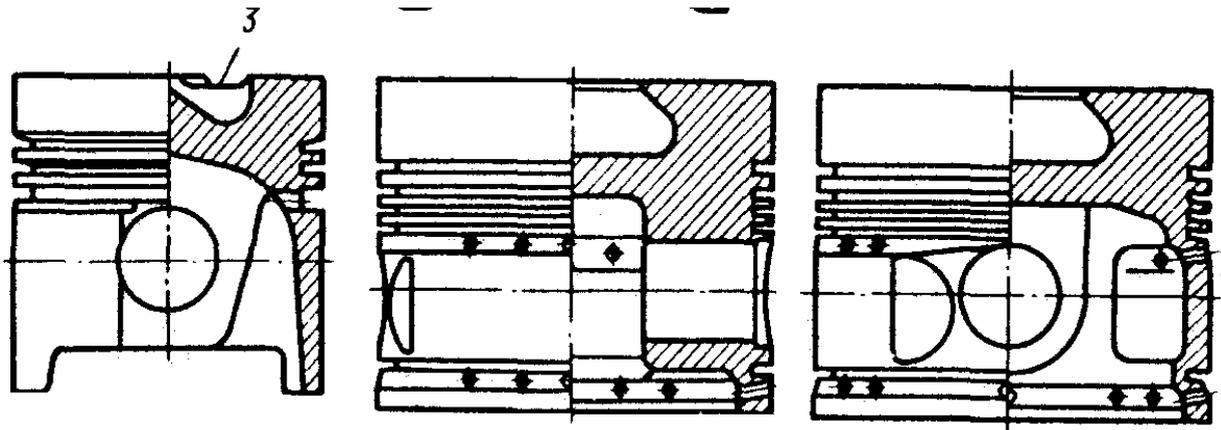


Рисунок 1.2 – Конструкция поршней ДВС:

Сложные конструкции поршней ДВС с большим количеством мелких элементов, тепловые потоки, изменяющиеся как по направлению, так и по величине и действующие на элементы поршня, в конечном итоге приводят к градиентному распределению температур по объему поршня и из-за этого – к существенным меняющимся местным термическим деформациям и напряжениям (рис. 1.3) [112, 116].

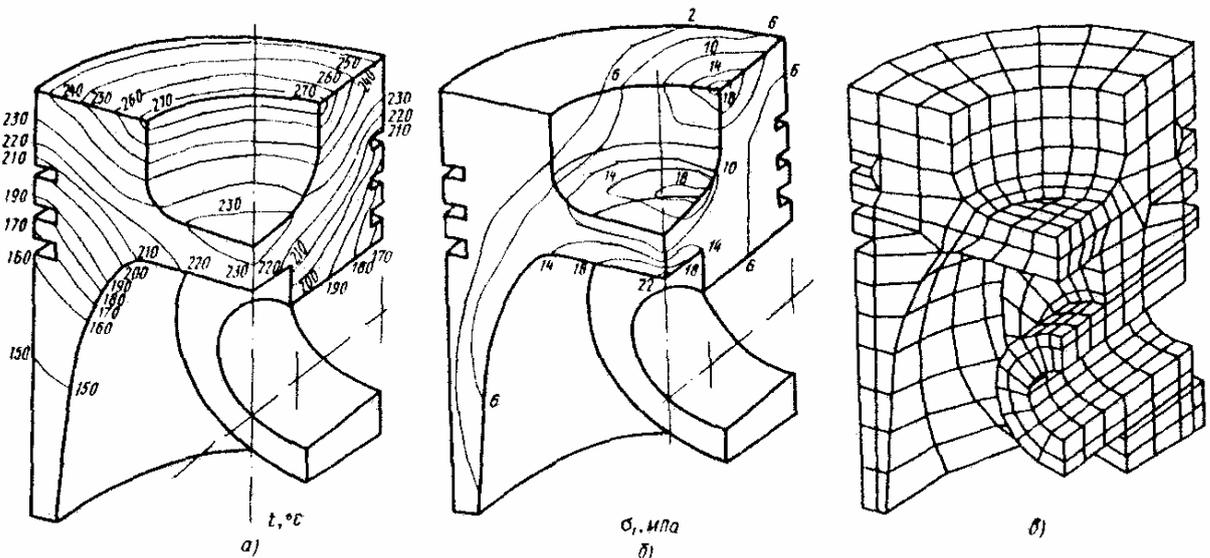


Рисунок 1.3 – Температурное поле (а) и минимальные главные напряжения поршня дизеля (б), полученные с помощью конечно-элементной модели (в)

Теплота, которая воздействует на поршень через его головку, находящуюся в контакте с цилиндром двигателя, отводится с помощью системы охлаждения: 60...70 % тепла через компрессионные кольца отводится в охлаждаемую стенку цилиндра, 20...30 % отводится с помощью юбки поршня ДВС, 5...10 % отводится через внутреннюю поверхность днища поршня ДВС с помощью системы смазки. Помимо этого, на поршень ДВС воздействует теплота, образующаяся из-за трения деталей цилиндра-поршневой группы.

К основным конструктивным элементам поршня ДВС относится высота поршня H , которая в свою очередь определяется в зависимости от высоты головки поршня h . При малых значениях высоты поршня значительно увеличивается воздействие зазоров на характер движения поршня, особенно отклонение эксплуатационных и производственных зазоров от допускаемых между деталями цилиндра-поршневой группы. Нарушение регламентированных зазоров вызывает нарушение процессов газо- и маслоуплотнения блока цилиндров, вызывает увеличение износа канавок компрессионных колец.

Высота головки поршня ДВС обуславливает его массу и габаритные размеры, поэтому она должна быть минимально возможной с условием обеспечения регламентированного температурного режима работы деталей цилиндра-поршневой группы. При этом, особенно важно обеспечить допускаемую температуру в бобышках поршня и в месте контакта верхнего компрессионного кольца.

1.4 Выводы по главе

На основании проведенного обзора можно сделать следующие выводы.

1. В настоящее время разработаны и успешно применяются антифрикционные покрытия, имеющие в своем составе различные компоненты. Большинство исследователей для снижения коэффициента трения вводит в покрытие углерод в какой-либо из его форм. Поскольку для рассмотрения эф-

фективности использования разрабатываемых антифрикционных покрытий выбран поршень двигателя внутреннего сгорания, изготавливаемого из силуминов, то основой покрытия может стать алюминий ввиду его большого химического сродства с материалом изделия.

Для создания современных антифрикционных покрытий возможно применение новых материалов – наноструктурированных порошков, включающих алюминиевую матрицу и равномерно распределенные в ней ультрадисперсные частицы. Особое положение в качестве функциональной фазы в композите занимают углеродные структуры, такие как графены, онионы, нанотрубки, наноалмазы и фуллерены C_{60} . Ввиду их малых размеров, эти частицы имеют высокие показатели прочностных и других свойств, а использование их в качестве упрочняющей фазы позволит создать композиционные материалы, имеющие уникальный комплекс физико-механических свойств.

2. Покрытия, повышающие трибологические характеристики изделий, возможно получить различными способами. Для решения задачи повышения антифрикционных свойств рабочих поверхностей на примере поршня двигателя внутреннего сгорания, предлагается использовать технологию детонационного напыления. Способ детонационного напыления позволяет избежать недостатков электролитических методов получения покрытий и диффузионной металлизации, которые заключаются в продолжительности процесса создания покрытия, а также в напылении относительно тонких слоев (слои не превышают десятков микрон), плазменного напыления, газоплазменной наплавки и подобных технологий, при которых происходят термическая деформация обрабатываемой детали и фазовые превращения в материалах из-за интенсивного нагрева. Детонационные покрытия, получившие наибольшее распространение в авиационной и судостроительной промышленности отличаются от покрытий, полученных другими способами, прежде всего качеством: высокой твердостью, износо-, жаро- и эрозионной стойкостью, что определяет их перспективность применения на ответственных деталях ДВС.

3. В процессе эксплуатации двигателя внутреннего сгорания на поршень воздействуют крайне значительные нагрузки, как механические, так и тепловые. В связи с этим, условия работы поршня двигателя можно охарактеризовать как очень сложные. Основной проблемой, так и не решенной в настоящее время, является создание на поверхности поршня антифрикционных слоев с достаточной износостойкостью при этом.

4. В связи с этим целью диссертации является получение алюмоматричных композиционных материалов в порошковом виде для дальнейшего формирования на их основе антифрикционных покрытий тяжело нагруженных изделий газодетонационным способом.

5. 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.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Оборудование для газодетонационного напыления покрытий

2.1.1 Сущность способа газодетонационного напыления

Сущность способа газодетонационного напыления заключается в следующем (рис. 2.1) [102].

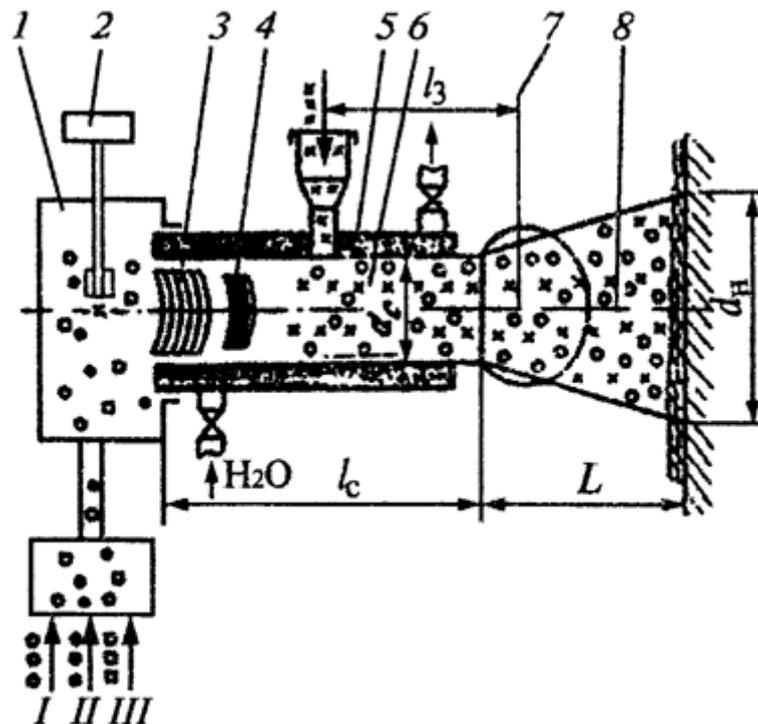


Рисунок 2.1 – Схема детонационно-газового напыления:

I – горючий газ; II – кислород; III – технологический газ; d_c – диаметр ствола;
 l – длина ствола; L – дистанция напыления d_n – пятно напыления

В камеру сжигания 1 подается заданное количество газовой смеси – горючего газа и кислорода. Возможна также подача технологического газа, которым регулируют теплофизические характеристики продуктов реакции. При помощи системы создания маломощного электрического разряда 2 (свеча) осуществляют поджигание смеси. В результате возникают тепловые волны 3,

которые способствуют зарождению детонационной волны 4. Напыляемый порошок из бункера-дозатора вводится в поток газа на определенном расстоянии от среза ствола, называемом глубиной загрузки. Некоторые типы установок имеют прямоточную систему подачи порошка со стороны камера сгорания вдоль оси ствола [117]. На срезе ствола установки образуется дульное пламя 7 и двухфазный поток 8 – продукты детонации и напыляемые частицы.

Процесс газодетонационного напыления является циклическим. Принципиальная схема газодетонационного напыления приведена на рисунке 2.2 [118].

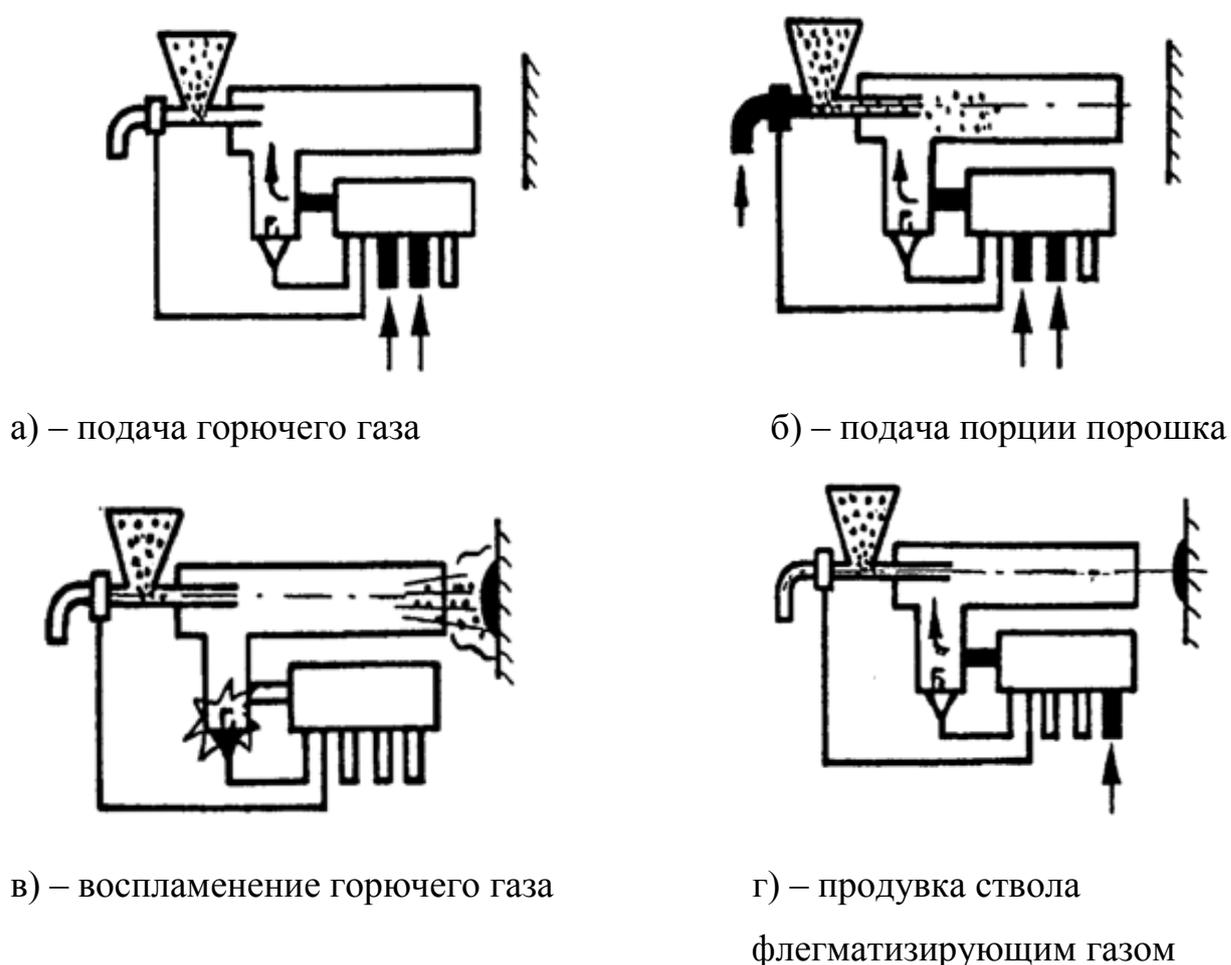


Рисунок 2.2 – Схема процесса детонационного напыления

С помощью блока газорегулирования ствол пушки заполняется смесью газов, способных детонировать (рис. 2.2, а). Далее, посредством транспортирующего газа в ствол подается заданная навеска напыляемого порошка, по-

сле чего клапаны подачи газовой смеси и порошка закрываются (рис. 2.2, б). Блок поджига вырабатывает инициирующий импульс, который воспламеняет газовую смесь (рис. 2.2, в).

При поджигании газовой смеси, способной к детонации, в некотором объеме возникает ламинарное горение, скорость распространения которого относительно невозмущенного газа составляет от 5 до 15 м/с. Расширяющиеся продукты горения создают волны сжатия, которые распространяются со скоростью звука в невозмущенном потоке. Из-за ударной волны газ может сжаться вплоть до давления несколько десятков МПа. В дальнейшем развитие процесса горения связано с турбулизацией пламени, в результате чего поверхность горения увеличивается, и скорость потока относительно несгоревшего газа возрастает [117].

Для образования детонационного горения смеси необходима высокая скорость фронта пламени, обеспечивающая соответствующее термодинамическое состояние сжатого газа. Длина преддетонационного участка определяется длиной пути, необходимого для развития пограничного слоя и турбулизации потока, что составляет от 20 до 30 диаметров трубы [117, 118]. В коротких трубах переход горения в детонацию может быть ускорен искусственной турбулизацией. При скорости пламени, превышающей скорость звука в данной газовой среде, характер процессов горения резко изменяется и образуется детонационная волна, которая является комбинацией ударной волны и зоны химической реакции.

После образования газодетонационной волны ее скорость движения достигает значения, вполне определенного для состава данной смеси. Далее детонационная волна распространяется с этой постоянной скоростью и имеет определенные параметры: температуру, напорное давление, плотность струи. Скорость распространения детонационной волны в зависимости от применяемых горючих газов может находиться в пределах от 1600 до 3300 м/с [118].

На выходе из ствола установки формируется дульное пламя (продукты детонации) и поток из напыляемых частиц.

Экспериментальные данные по скорости детонации показывают, что есть возможность довольно широкого варьирования параметров детонационной волны путем изменения соотношения горючих газов [119].

Для практического использования явления детонации при нанесении покрытия наибольший интерес представляет собой скорострельные характеристики частиц порошка [120]. Частицы порошка имеют две стадии разгона: первая – потоком продуктов детонации за фронтом детонационной волны; вторая – при истечении продуктов детонации из ствола. После первой стадии частицы имеют скорость порядка десятков метров, после второй стадии частицы порошка приобретают скорость порядка сотен метров секунду.

Продукты детонации истекают из ствола в виде нерасчетной струи [117]. При этом, газовая струя увлекает за собой напыляемые частицы. Напыляемые частицы нагреваются и ускоряются. В результате образуется двухфазный поток, который состоит из продуктов газовой детонации и струи напыляемых частиц [120].

При движении двухфазного потока внутри ствола, частицы напыляемого материала претерпевают следующие превращения [102]:

- плавление;
- дробление;
- испарение;
- взаимодействие со стенками ствола;
- взаимодействие с газовой средой.

Температура продуктов детонации достигает от 3000 до 4000 К, поэтому достаточно мелкие частицы материала расплавляются и взаимодействуют с материалом подложки в уже жидком состоянии. Более массивные частицы двухфазного могут быть оплавлены лишь с поверхности. Нагрев частиц начинается непосредственно после прохождения детонационной волны, и

энергия продуктов детонации убывает экспоненциально. После вылета из ствола частицы, находящиеся в струе продуктов детонации не остывают и почти не тормозятся. Разрушение струи происходит на расстояниях порядка пяти калибров ствола, чем определяется допустимая дистанция напыления.

На рисунке 2.3 приведена схема образования покрытия при газодетонационном напылении [102].

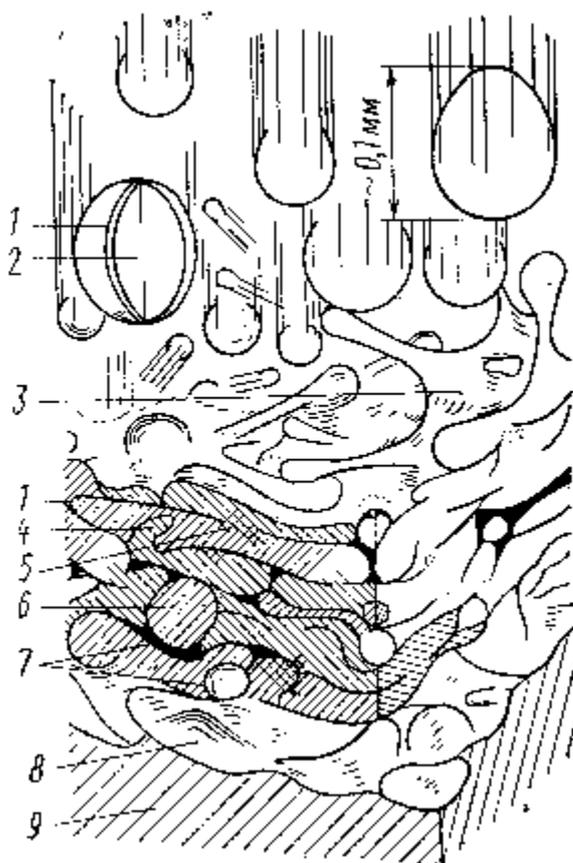


Рисунок 2.3 – Схема образования покрытия при напылении:

1 – оксидная пленка; 2 – частица расплавленного напыляемого материала; 3 – частица при столкновении с поверхностью; 4 – участок механического сцепления; 5 – участок локального сплавления; 6 – не полностью расплавленная частица; 7 – пора; 8 – поверхность основного материала; 9 – основной материал

Во время движения к подложке частицы из-за нахождения в высокотемпературном газовом потоке оплавляются, в результате чего на их поверхно-

сти начинает образовываться оксидная пленка. В результате столкновения с большой скоростью с подложкой либо поверхностным слоем сформированного ранее покрытия частицы напыляемого материала расплющиваются, растекаясь по поверхности. Из-за этого образуется достаточно тонкая прослойка напыляемого материала, которая механически сцеплена с поверхностью подложки (либо образовавшегося ранее покрытия). Прилипание частиц напыляемого материала происходит в результате механического сцепления тонкой прослойки отдельной частицы с макровыступами основного материала. Кроме того, из-за сильного ударного воздействия оксидная пленка на поверхности подложки может частично разрушиться, в результате за счет сил Ван-дер-Ваальса и механического сцепления напыляемый материал лучше сцепляется с основой. Однако оценка энергии взаимодействия показывает, что происходит и химическое соединение частиц и подложки [102]. В месте образования ювенальных поверхностей происходит сплавление частиц напыляемого материала с основным материалом. Химическая связь между покрытием и подложкой предопределяет высокие адгезионные свойства. Из-за различия во фракционном составе напыляемого материала среди расплавленных частиц могут присутствовать и не полностью расплавленные. Такие частицы, при столкновении с подложкой и верхними слоями сформированного покрытия оказывают дополнительное ударное воздействие на покрытие, повышая тем самым адгезионные свойства покрытия в целом. В результате многократного повторения цикла напыления структура сформированного покрытия будет обладать характерной слоистостью [119].

Пескоструйная обработка поверхности детали перед напылением приводит к увеличению в несколько раз контактной площади и к активации поверхности. Также, применяя пескоструйную подготовку поверхности, детонационным методом удастся наносить тугоплавкие материалы даже на детали с практически любой твердостью.

Достоинства газодетонационных покрытий в сравнении с покрытиями, полученными газопламенными либо плазменными методами определяются определенными отличиями механизма формирования [121]. Главную роль играют крупные нерасплавленные частицы, которые располагаются в хвосте двухфазного потока. Они соударяются с покрытием, которое уже частично сформировано из частиц начала и середины этого потока. Помимо теплового воздействия частицы при ее ударном взаимодействии с подложкой, на каждый предыдущий слой оказывает влияние деформирующие удары последующих слоев. В результате проявляются эффекты абразивного воздействия и эффект ударного прессования, которые приводят к увеличению плотности уже сформированного покрытия, и, как следствие, к уменьшению количества пор или даже к их полной ликвидации [102]. Кроме того, эффект ударного горячего прессования может проявляться и в случае взаимодействия двухфазного потока с покрытием, которое уже сформировалось результате предыдущего цикла напыления.

Помимо этого, значительным отличием детонационного напыления от плазменного является существенно большая концентрация напыляемых частиц непосредственно в момент образования покрытия [118, 122]. Это, в частности, приводит к усилению эффекта ударного прессования, и соответственно, к повышению физико-механических характеристик формируемых покрытий.

2.1.2 Экспериментальная установка газодетонационного напыления «Катунь М», ее отдельные узлы и системы

В общем виде все детонационные установки состоят из следующих основных узлов, рисунок 2.4 [121]:

- блока 4, предназначенного для подачи напыляемого порошка или дозирующее устройство («дозатор»);

- блока 1, который служит для подачи и заполнения ствола детонационной установки рабочими газами;
- блока искрового воспламенителя 2 («свеча зажигания») и блока зажигания 3, которые предназначены для инициирования взрыва;
- ствола 5, или технологического канала который представляет собой трубу диаметром 20 мм, длиной до 25000 мм, который служит для направленного движения детонации в сторону открытого конца.

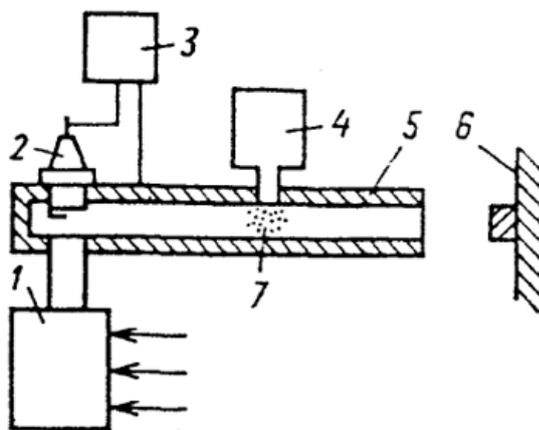


Рисунок 2.4 – Схема детонационного устройства

Принцип действия установки детонационного напыления в общем виде состоит в следующем. Газовая смесь из блока 1 подается в ствол 5. В это же время через дозирующее устройство из порошкового дозатора (блок 4) определенными порциями транспортирующим газом – азотом, аргоном или воздухом подают порошок в газовую смесь непосредственно перед ее зажиганием. При помощи свечи 2 поджигают газовую смесь. В результате воспламенения и образования детонации по стволу происходит взрыв. Взрыв сопровождается выделением значительного количества теплоты и продуктов химической реакции, которая ускоряет и переносит по стволу и в конечном итоге на поверхность подложки 6 частицы напыляемого материала 7 со скоростью, определяемой составом газа и геометрией ствола.

В настоящее время разработаны и промышленно применяются различные газодетонационные установки. Их конструктивные отличия определяют

ся, главным образом, спецификой области применения газодетонационных установок для напыления как разных классов материалов, так и попытками обеспечения более производительных параметров процесса напыления [122]. Одной из разработок является установка «Катунь М», в конструкции которой применяется коническая ствольная часть с углом раскрытия, равным 4° (рис. 2.5). Из-за использования конического канала стало возможным уменьшить габаритные размеры ствольной части газодетонационной установки до значения 600 мм, при этом, характеристики покрытия оставались на том же уровне.

Установка газодетонационного напыления «Катунь М» служит для напыления покрытий из порошков на поверхности различных деталей для формирования у них отличающихся свойств по сравнению с подложкой. В качестве детонирующей смеси используется состав «пропан-бутан – кислород».

Газодетонационная установка размещена в вентилируемом боксе со звуковой изоляцией от шума, происходящего при взрыве. Бокс имеет тамбур с двойными дверьми и смотровые окна из стеклопакетов.

В состав экспериментального комплекса установки «Катунь М» (рисунки 2.5, 2.6) входят следующие основные элементы:

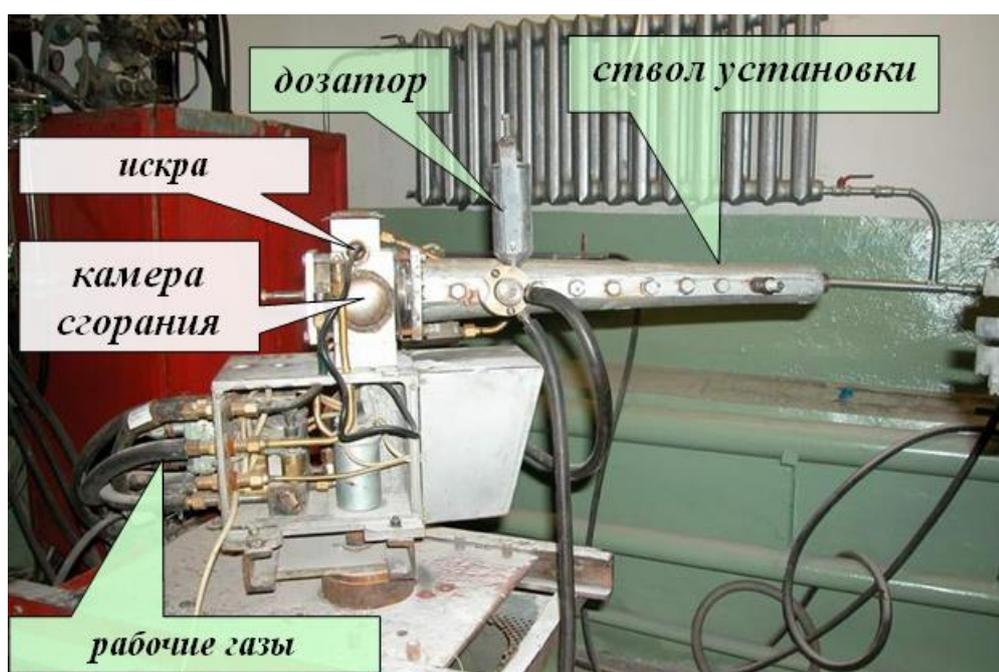


Рисунок 2.5 – Установка газодетонационного напыления «Катунь М»

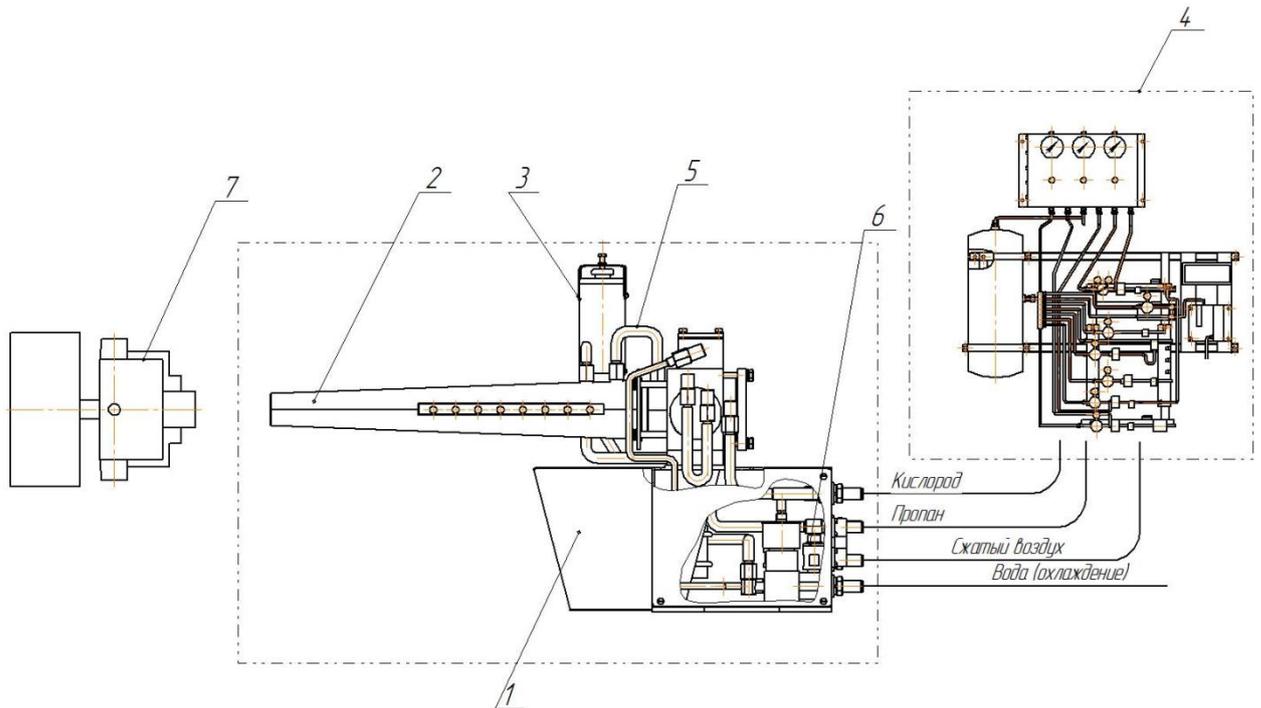


Рисунок 2.6 – Схема детонационной установки:

- 1 – система зажигания;
- 2 – собственно блок напыления установки
- 3 – дозатор порошковый;
- 4 – станция газораспределения;
- 5 – свеча зажигания;
- 6 – система охлаждения;
- 7 – манипулятор для перемещения детали (изделия)

Управляющим блок установки ДГН (рисунок 2.7) обеспечивает функции:

- 1 Контроль обратного удара.
- 2 Выполнение программы циклограммы;
- 3 Обеспечение нужного давления подачи кислорода, охлаждающей жидкости, воздуха;



Рисунок 2.7 – Блок цифрового управления установки ДГН «Катунь М»

Блок управления отображает на экране:

- количество совершенных циклов в определенной серии напыления;
- обеспечивает надежного запуска установки и ее выключение;

Манипуляторы изменяют положение детали в процессе напыления.

Система охлаждения установки «Катунь М» предназначена для обеспечения защиты от перегрева форкамеры, ствола и других частей установки из-за воздействия рабочих газов в процессе детонации. Для охлаждения в форкамере имеются входная и выходная магистрали, обеспечивающие циркуляцию охлаждающей среды. В качестве охлаждающей жидкости в УДГН «Катунь М» используется вода из системы водоснабжения.

Для подачи порошка в ствол установки используется дозатор, устройство которого приведено на рисунке 2.8. Дозирование напыляемого порошка происходит радиальным способом, в плоскости, перпендикулярной направлению потока. В бункер пневматического дозатора помещается порошковый материал для напыления. Транспортирующим газом производится вдувание порошковой порции в ствол.

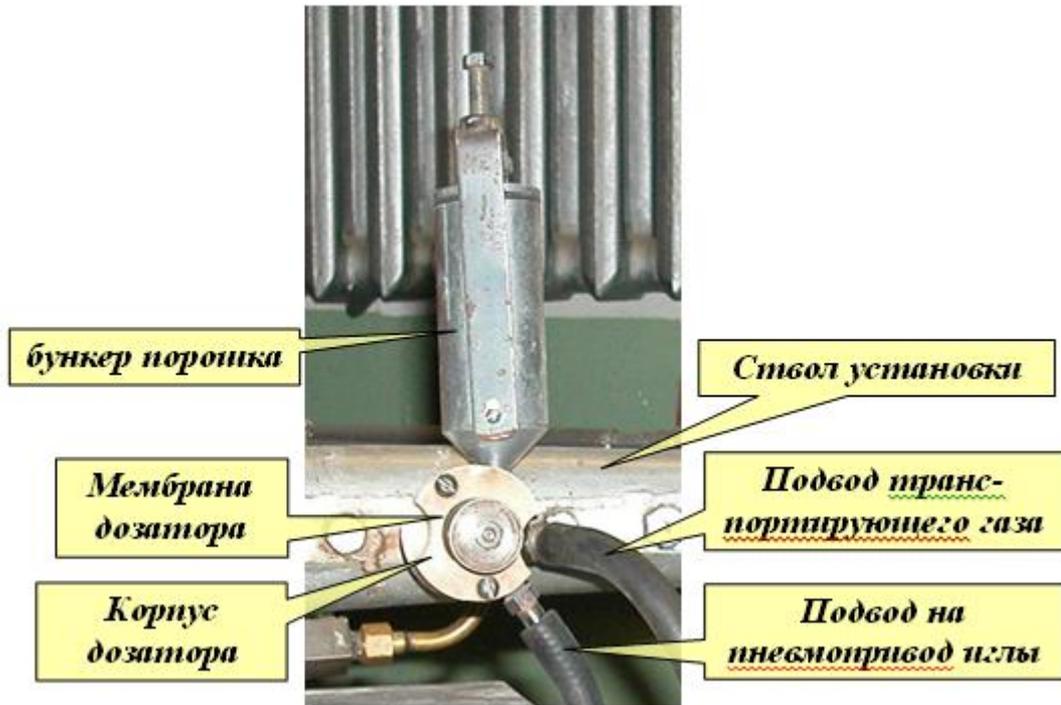


Рисунок 2.8 – Дозатор установки ДГН

Расход напыляемого порошка выполняют за счет варьирования расстояния под выходным отверстием бункера. Для запираания внутренних каналов дозатора от продуктов сгорания и предотвращения их отрицательного влияния на напыляемый порошок применяется коническая игла [40 118]. По сигналу от блока управления производится открытие иглы. Закрытие иглы происходит за счет действия обратной пружины.

Газораспределительная секция (рисунок 2.9) обеспечивает предварительную подготовку горючей смеси и воздуха, их подачу и контроль за расходом газов.

Нанесение порошковых материалов на поверхность детали осуществляется определенным количеством циклов напыления путем совмещения пятен покрытия.

Рабочие газы – пропан-бутановая смесь, кислород и сжатый воздух – подаются в блок газорегулирования от газовых баллонов или магистралей.



Рисунок 2.9 – Газораспределительная станция

Технические характеристики установки детонационного напыления приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Техническая характеристика детонационной установки

Частота циклов, цикл/с	1 – 10
Расход газов, м ³ /ч	
пропан-бутановая смесь	2 – 3,5
кислород	10 – 12
сжатый воздух	10...15
Давление газов, МПа	
смесь пропан-бутановая	0,05 – 0,15
кислород	0,6 – 1,0
сжатый воздух	0,05 – 0,25
Расход воды, м ³ /ч	0,25
Потребляемая мощность (электрическая), кВт	3
Производительность по площади напыления, м ² /ч	0,2 – 1,0
Уровень звукового шума при работе установки, дБ	140

Габаритные размеры блоков, мм	
блок детонационного напыления	794×240×483
блок газорегулирования	1800×1450×350
блок управления	490×450×200
Масса установки без манипулятора, кг	105

На сегодняшний день созданы и эксплуатируются в промышленных условиях установки газодетонационного напыления различного типа. Их конструктивные отличия зависят, главным образом, от специфики назначения установки: некоторые из них разрабатывались для напыления определенного материала, другие - в целях достижения более производительных параметров процесса напыления.

Установка газодетонационного напыления «Катунь М» служит для создания покрытий на основе различных порошковых смесей, получаемых на рабочих поверхностях изделий разного рода для придания им особых свойств, существенно отличающихся от свойств исходного изделия.

Штатный режим работы «Катунь М» - импульсный. Базовая длительность импульса (цикла напыления) составляет 250 мс. Конкретная длительность может варьироваться в зависимости от напыляемого материала и задается с помощью блока управления по циклограмме напыления. Рабочими газами служат пропан-бутан и кислород. Для обеспечения высоких скоростных характеристик напыляемого материала используют коническую ствольную часть (рис. 2.5).

Основные технические параметры установки «Катунь М»:

- частота выстрелов 4-9 выстрелов/с;
- расход горючих газов: кислород не более 12 м³/ч, пропан-бутановая смесь не более 3,5 м³/ч,
- расход транспортирующего газа (сжатый воздух): не более 15 м³/ч;
- расход охлаждающей жидкости (воды): не более 0,25 м³/ч;

- производительность напыления: до $0,5 \text{ м}^2/\text{ч}$ при толщине 300 мкм;
- фракционный состав напыляемых порошков: от 10 до 120 мкм.

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:

- 1) стехиометрическое соотношение
- 2) окислительное
- 3) восстановительное

2.2 Материалы для создания покрытий

В качестве исходных материалов для получения порошковых композиционных смесей использовали порошок алюминия марки АД0, порошок 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 выполняются операция по механической активации. Применение механоактивации обусловлено необходимостью получения порошковой композиционной смеси для напыления.

Выбор компонентов порошковой смеси обусловлен рядом факторов [124-126]:

- необходимостью обеспечить химическое сродство материала покрытия к материалу основы (поршня). Поскольку поршень в нашем случае изго-

тавливается из силумина, то в качестве матрицы композиционной смеси логично выбрать алюминий.

- необходимостью обеспечить низкие коэффициенты трения в паре трения поршень-цилиндр. Для выполнения этого требования с учетом анализа современного состояния вопроса был выбран перспективный материал – фуллерен C_{60} .

Для обеспечения создания механокомпозитов, повышения активности материалов, снижения эффекта налипания порошкового материала на мелющие тела и внутренние стенки барабанов активатора, а также для уменьшения степени агломерирования итоговой смеси в исходную смесь добавляли 1 вес. % этилового спирта.

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

- 1) смесью 70% Al + 30% C_{60} + V_4C_5 ;
- 2) смесью 70% Al + 30% C + V_4C_5 .

Выбор процентного соотношения порошков исходных компонентов сделан с учетом ранее выполненных автором исследований, а также по анализу других работ, направленных на создание покрытий из композиционных материалов с дисперсной структурой.

2.3 Подготовка порошков. Механоактивационная обработка порошковых смесей

При постановке экспериментальной части диссертации использовали комплекс оборудования и методик, имеющихся и разработанных Проблемной научно-исследовательской лаборатории самораспространяющегося высокотемпературного синтеза им. В. В. Евстигнеева АлтГТУ [127-131].

Этап подготовки порошкового материала и условия ее осуществления являются во многом определяющим для адгезионных и когезионных свойств, а также равномерности покрытия.

Для обеспечения создания композиционной смеси был использован метод механической активации с использованием планетарных шаровых мельниц-активаторов как наиболее перспективный и легкий в управлении способ получения механокомпозитов [132, 133].

Схема активатора АГО-2С, примененная для создания механокомпозита, представлена на рисунках 2.10-2.11. Конструктивно мельница состоит из:

- цилиндрического корпуса 1;
- емкостей 2 с мелющими телами (барабаны), предназначенных для размола порошкового материала;
- водила 3, предназначенного для вращения барабанов вокруг оси мельницы.

Варьирование частоты вращения водила обеспечивается за счет частотного преобразователя.

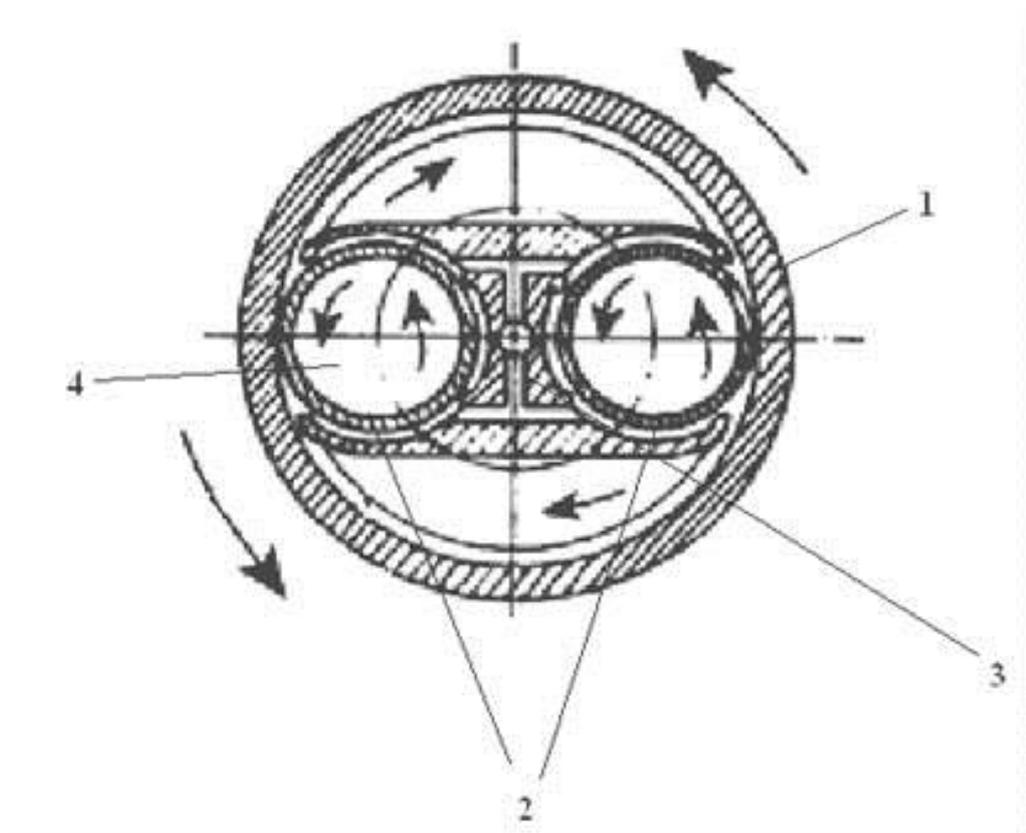


Рисунок 2.10 – Схема работы активатора АГО-2С



Рисунок 2.11 – Общий вид активатора АГО-2С

Технические характеристики АГО-2С следующие:

Создаваемое ускорение, g – 20, 40, 60;

Объем барабанов – 160см^3 ;

Диаметр мелющих тел – 8мм;

Масса мелющих тел – 200 г;

Масса порошка в одном барабане – до 10 г;

Режим работы активатора – непрерывный.

Методика механической активации состоит из несколько этапов:

1. Взвесить исходные порошковые материалы для обеспечения необходимого соотношения компонентов по массовым процентам. При необходимости вместо взвешивания использовать объемные доли компонентов. Засыпать порошки в барабаны (рис. 2.12).

2. После установки уплотнительной резиновой прокладки закрыть барабаны крышкой. При необходимости создать инертную атмосферу внутри барабана путем закачки аргона через клапан крышки барабана.
3. Установить барабаны в водило активатора (рис. 2.11).
4. Закрывать активатор крышкой, включить систему охлаждения активатора.
5. С помощью частотного преобразователя установить необходимую частоту вращения водила, включить активатор (рис. 2.13). Выждать необходимое время активации.
6. Выключить активатор, отключить систему охлаждения.
7. Вытащить барабаны из активатора.
8. Извлечь порошковую композиционную смесь из барабанов.



Рисунок 2.12 – Барабан активатора АГО-2С и мелющие тела, извлеченные из барабана



Рисунок 2.13 - Частотный преобразователь системы включения АГО-2С

Перед активацией проводилась предварительная сушка исходных порошковых материалов (температура сушки 70 °С, время процесса 12 часов).

С учетом анализа работ по тематике механической активации [127-133] и наработанного опыта интенсивности размола была выбрана в 400 м/с². Время механоактивации смеси варьировалось и составляло 5...15 минут. После механической активации смесь подвергалась фазовому анализу.

2.4 Методы исследования порошковой композиционной смеси и покрытий

2.4.1 Оптическая микроскопия

Структуру покрытия исследовали с помощью инвертированного оптического микроскопа Axio Observer Z1m фирмы Carl Zeiss. Микроскоп имеет возможность работы в режимах контрастирования светлого, тёмного поля и дифференциально-интерференционного контраста. Прибор снабжен камерой высокого разрешения Axio Cam MRc5, а программное обеспечение позволяет

проводить автоматическое определение размеров зерна и наличие второй фазы. Для исследования использовались объективы с возможностью увеличения от 50 до 1000 крат.

2.4.2 Растровая электронная микроскопия

Исследования частиц механокомпозитов, полученных в результате обработки в АГО-2С, проводились с помощью растрового электронного микроскопа EVO 50 фирмы Carl Zeiss с разрешающей способностью 2 нм. Ниже представлены основные возможности данного микроскопа, которые использовались в нашей работе:

1. Исследование внутреннего строения металлических и неметаллических материалов;
2. Исследование особенностей строения поверхности;
4. Получение фотографий высокого разрешения в цифровом виде.

Исходя из возможностей оборудования, были выбраны следующие направления деятельности при использовании данного прибора:

1. Исследование порошковой смеси, предназначенной для напыления;
2. Электронно-микроскопические исследования покрытий, полученных из порошков механокомпозитов с помощью установки газодетонационного напыления.

Измерения проводили при увеличении от 100 до 1200 крат. С использованием оптического микроскопа в работе проводились исследования внутреннего строения всех разработанных материалов. Оценивали особенности строения как матричных материалов, так и частиц упрочняющей фазы.

Рентгеноспектральный микроанализ материалов проводили на растровом электронном микроскопе EVO 50 фирмы Carl Zeiss, снабженном микроанализатором EDS X-Act (Oxford Instruments). Прибор позволяет производить анализ элементов в диапазоне от бора до урана. Разрешение по Mn К α

составляет 133 эВ. Микроанализатор обладает функцией картирования и определения химического анализа вдоль выбранной линии.

2.4.3 Рентгенофазовый анализ

Структурно-фазовый анализ образцов порошковой композиционной смеси и образцов с покрытиями осуществлялся на дифрактометре рентгеновском общего назначения ДРОН-6, на медном излучении $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1,5418 \text{ \AA}$). Образцы подготавливались по стандартным методикам, а дифрактограммы всех образцов регистрировались в идентичных условиях, что позволило более корректно сравнивать полученные величины. Шаг сканирования составлял $h=0,05^\circ$, время экспозиции $t=3$ сек. Обработку и анализ экспериментальных данных осуществляли с помощью пакета программ PDWin.

2.4.4 Износостойкость и антифрикционность

Трибологические исследования полученных покрытий проводились с помощью триботехнического комплекса, разработанного на базе машины для испытания материалов на трение 2168 УМТ. Исследования антифрикционных и износостойких свойств проводились в режиме сухого трения по схеме «диск-колодка» при вращательном движении диска.

В качестве материала диска использовалась сталь 40, на внутреннюю поверхность колодки из алюминиевого поршневого сплава (АК21М2,5Н2,5) производили напыление покрытий. Перед каждым испытанием проводилась промывка пары трения и ее просушка с целью удаления продуктов износа.

Исследование износостойкости покрытий проводилось по ГОСТ 23.204-78 Обеспечение износостойкости изделий. Методы определения истирающей способности поверхностей при трении. Износостойкость измеряли по потере массы трущихся тел: относительную износостойкость брали как отношение

уменьшения массы образца после испытания к первоначальной массе этого же образца и выразили в процентах.

2.4.5 Топография поверхности покрытия

Анализ поверхности газодетонационных покрытий после напыления проводили с помощью оптического профилометра-интерферометра Veeco NT 9080 в режиме вертикального сканирования. Прибор с помощью цифровой видеокамеры регистрирует серию интерференционных картин, получая в результате 3D изображение с разрешением 3...5 нм по нормали к образцу. Шероховатость измерялась в центральной части образцов на произвольно выбранных областях размером 320×240 мкм. Для каждого образца получались значения высоты неровностей поверхности Ra (среднее арифметическое отклонение профиля) и среднеквадратической шероховатости поверхности Rq. Прибор обеспечивает точность измерения 0,1 %.

2.4.6 Методика моделирования процесса движения композиционной смеси в двухфазном потоке газодетонационной установки

Была разработана методика проведения виртуального эксперимента по процессу движения двухфазного потока (продукты детонации и частицы порошка) в камере и стволе установки детонационного напыления и проведено исследование линий тока частиц порошка. Исследование проводилось при помощи конечно-элементной методики «вычисляемая жидкостная динамика» (Computational Fluid Dynamics - CFD) в программном комплексе Ansys Workbench [134]. Моделирование движения частиц осуществлялось для частиц алюминия.

Математическая модель основана на уравнениях Навье-Стокса:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0,$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = S_i,$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + P)u_k + q_k - \tau_{ik}u_i) = S_k u_k + Q_H,$$

где u_i – компоненты вектора скорости газа;

ρ, P – плотность и давление газа;

S_i – внешние объемные силы;

E – полная энергия единичной массы газа;

Q_H – тепло, выделяемое в единичном объеме газа;

τ_{ik} – тензор вязких сдвиговых напряжений;

q_k – тепловой поток.

При моделировании горения использовалась модель конечной скорости химических реакций. В этом случае химическая реакция горения описывается как совокупность элементарных реакций.

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).

2.5 Выводы по главе

1. В АлтГТУ накоплен опыт получения наноструктурированных композитов различного состава, и мы полагаем, что технологией, позволяющей решить задачу равномерного распределения частиц упрочнителя в объеме матрицы, является процесс механической активационной обработки порошковых материалов. В основе процесса лежит использование планетарных шаровых мельниц.

2. Кроме того, в АлтГТУ разработана техническая документация на устройство детонационного напыления, изготовлена и используется опытно-промышленная детонационная установка «Катунь-М», имеется набор исследовательского оборудования для трибологических и материаловедческих ис-

следований. Таким образом, полагаем, что применение технологических процессов детонационного напыления алюмоматричных композиционных материалов, армированных углеродными дисперсными структурами, позволит повысить антифрикционные свойства рабочих поверхностей поршня двигателя внутреннего сгорания.

3. Исследование структуры порошковой смеси и газодетонационного покрытия проводили как на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer Z1m, так и на растровом электронном микроскопе EVO 50 фирмы Carl Zeiss. Измерения проводили при увеличении от 100 до 1200 крат. Рентгеноспектральный микроанализ материалов проводили на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50, снабженном микроанализатором EDS X-Act (Oxford Instruments).

3. Структурно-фазовый анализ образцов порошковой композиционной смеси и образцов с покрытиями осуществлялся на дифрактометре рентгеновском общего назначения ДРОН-6, на медном излучении $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1,5418 \text{ \AA}$). Обработку и анализ экспериментальных данных осуществляли с помощью пакета программ PDWin.

4. Трибологические исследования полученных покрытий проводились с помощью триботехнического комплекса, разработанного на базе машины для испытания материалов на трение 2168 УМТ, в режиме сухого трения по схеме «диск-колодка» при вращательном движении диска.

5. Анализ поверхности газодетонационных покрытий проводился с помощью оптического профилометра-интерферометра Veeco NT 9080 в режиме вертикального сканирования. Шероховатость измерялась в центральной части образцов на произвольно выбранных областях размером $320 \times 240 \text{ мкм}$.

6. Исследование по процессу движения двухфазного потока (продукты детонации и частицы порошка) в камере и стволе установки детонационного напыления проводилось конечно-элементной методикой «вычисляемая жид-

костная динамика» (Computational Fluid Dynamics - CFD) в среде Ansys Workbench.

ГЛАВА 3. СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УГЛЕРОДНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ

3.1 Исследование структурного состояния композиционной порошковой смеси состава «алюминий – углерод» после механической активации

На рисунке 3.1 представлена морфология смеси 90% Al + 10% C (об. %) после 7 минут механоактивационной обработки.

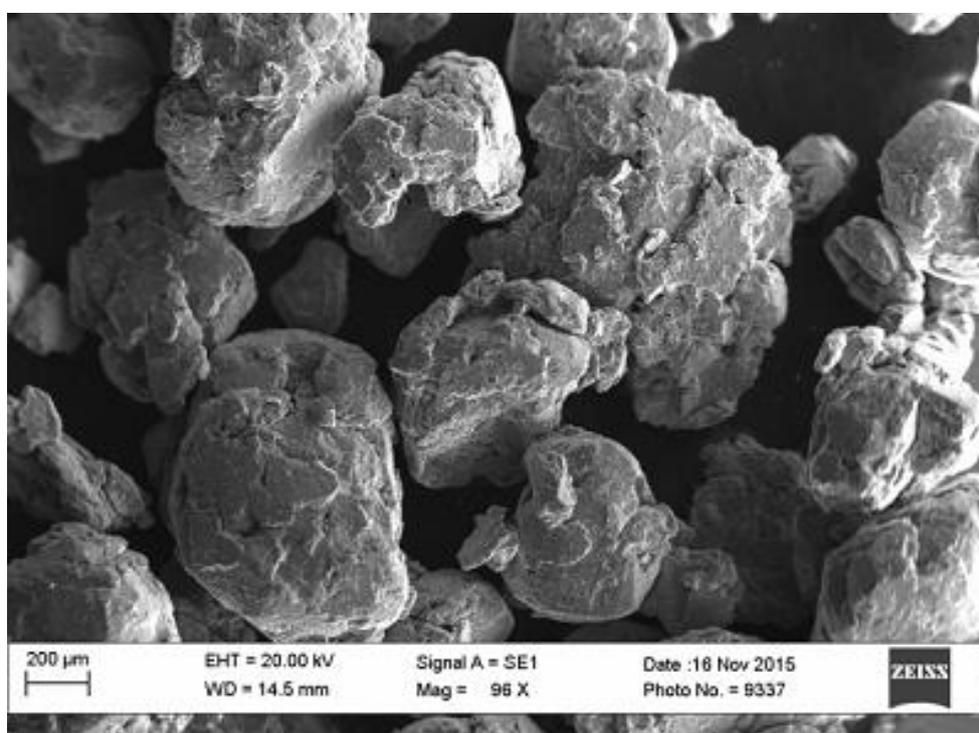
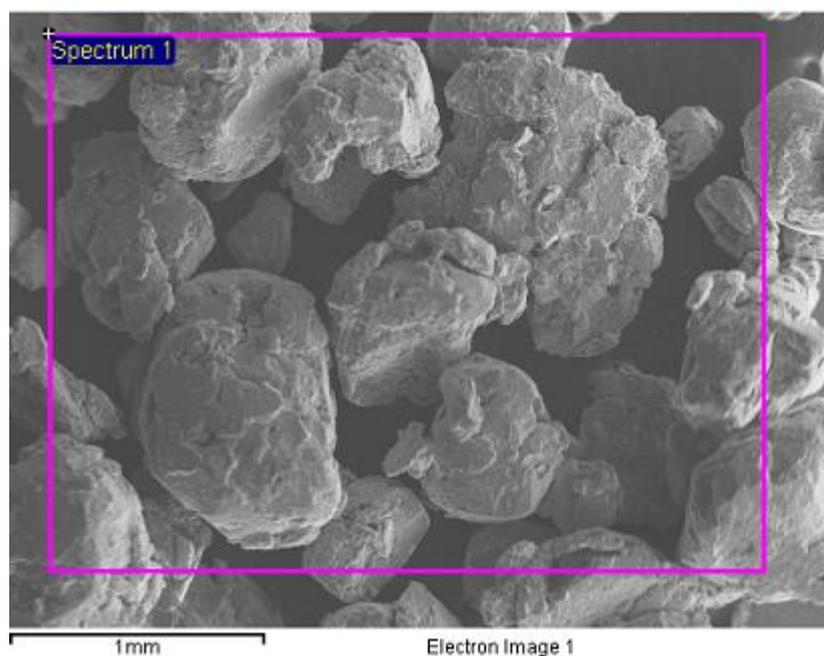


Рисунок 3.1 – Структура порошковой композиционной смеси состава 90% Al + 10% C (об. %), после 7 минут механоактивационной обработки

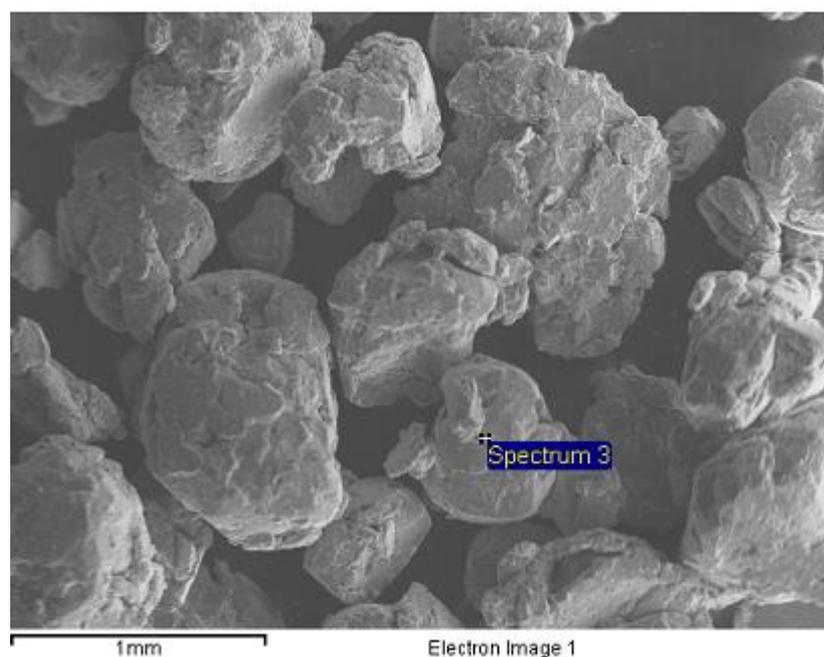
Полученный механокомпозит имеет выраженную слоистую структуру, частиц исходной шихты (алюминия и углерода) в составе композиционной порошковой смеси после механической активации не обнаружено. Средний размер получившихся частиц механокомпозита составляет порядка 400 мкм.

По среднему размеру полученная фракция является неприемлемой для газодетонационного напыления ввиду неравномерности процесса дозирования (из-за больших размеров частиц композиционной смеси) и, как следствие, невозможности обеспечения получения качественных покрытий [135].

Элементный состав данной смеси представлен на рисунке 3.2



Спектр 1 (по площади)	
Элемент	Весовой %
C	15,45
Al	84,55



Спектр 3 (в микроточке)	
Элемент	Весовой %
C	17,71
Al	82,29

Рисунок 3.2 – Энергодисперсионный анализ порошковой композиционной смеси состава 90% Al + 10% C (об. %), после 7 минут механоактивационной обработки

Анализ элементного состава позволяет констатировать, что окисления алюминия в процессе механической обработки не происходит.

Исходя из проведенного анализа морфологии механокомпозита, можно сделать вывод о необходимости изменения процентного содержания компонентов в процессе подготовки механокомпозитов с целью уменьшения средних размеров частиц композиционной порошковой смеси.

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 3.3).

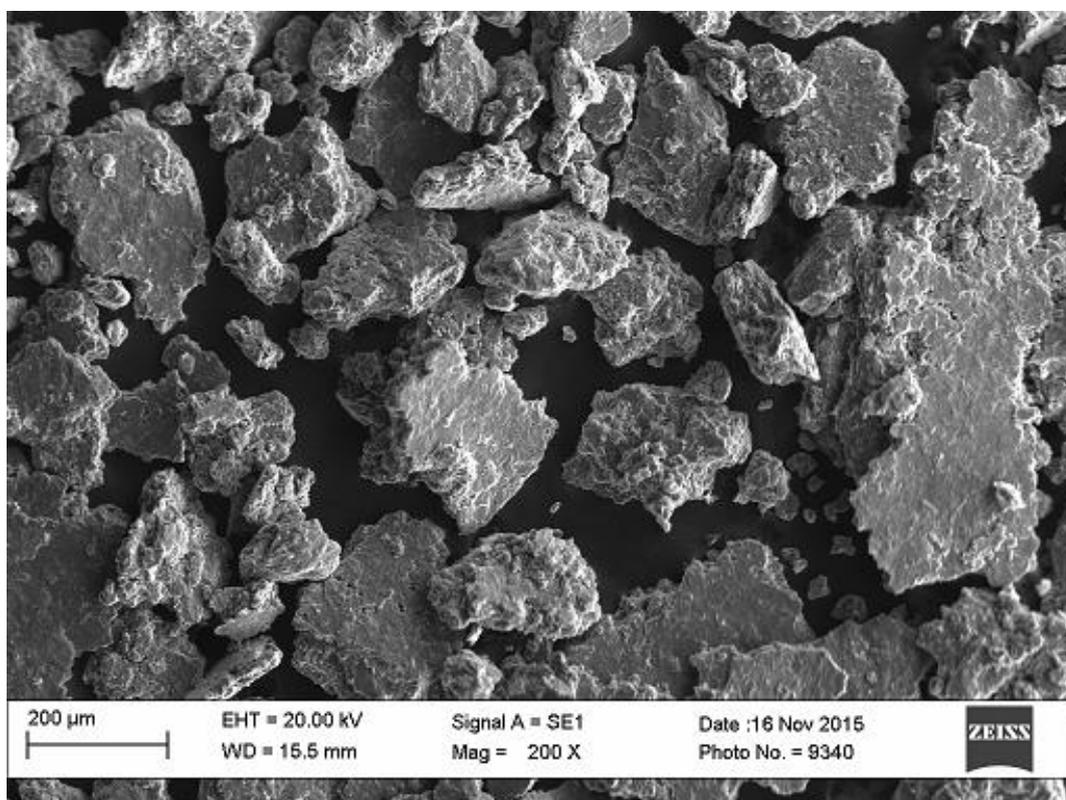
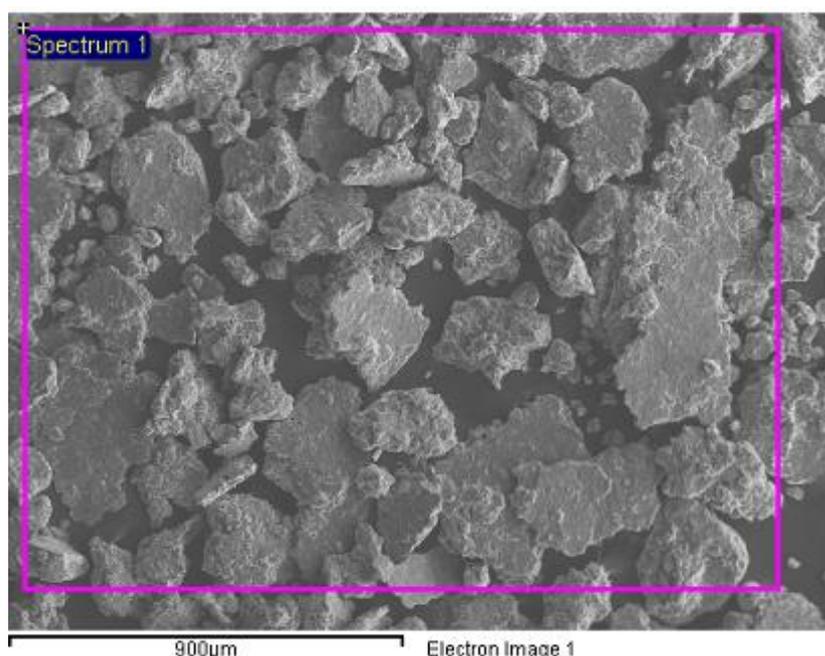
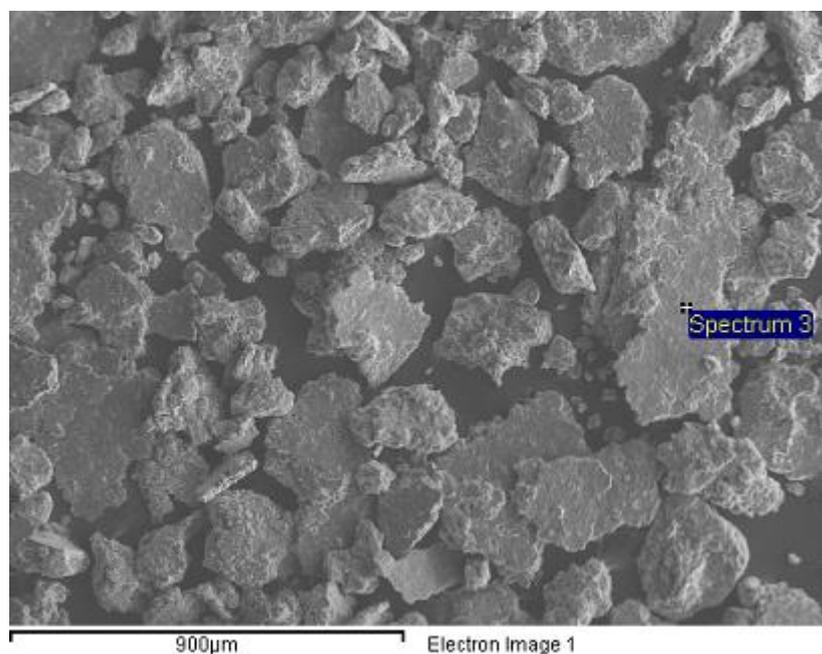


Рисунок 3.3 – Структура порошковой композиционной смеси состава 70% Al + 30% C (об. %), после 7 минут механоактивационной обработки

Элементный состав композиционной смеси состава 70% Al + 30% C (об. %) представлен на рисунке 3.4:



Спектр 1 (по площади)	
Элемент	Весовой %
C	32,99
Al	67,01



Спектр 3 (в микроточке)	
Элемент	Весовой %
C	24,48
Al	75.52

Рисунок 3.4 – Энергодисперсионный анализ порошковой композиционной смеси состава 70% Al + 30% C (об. %), после 7 минут механоактивационной обработки

Элементный анализ, как и в предыдущем случае, позволяет установить отсутствие окислов в композиционной порошковой смеси.

При увеличении времени механоактивации (при том же соотношении исходных компонентов в шихте) до 15 минут качественных изменений в морфологии композиционной смеси не обнаружено (рисунок 3.5).

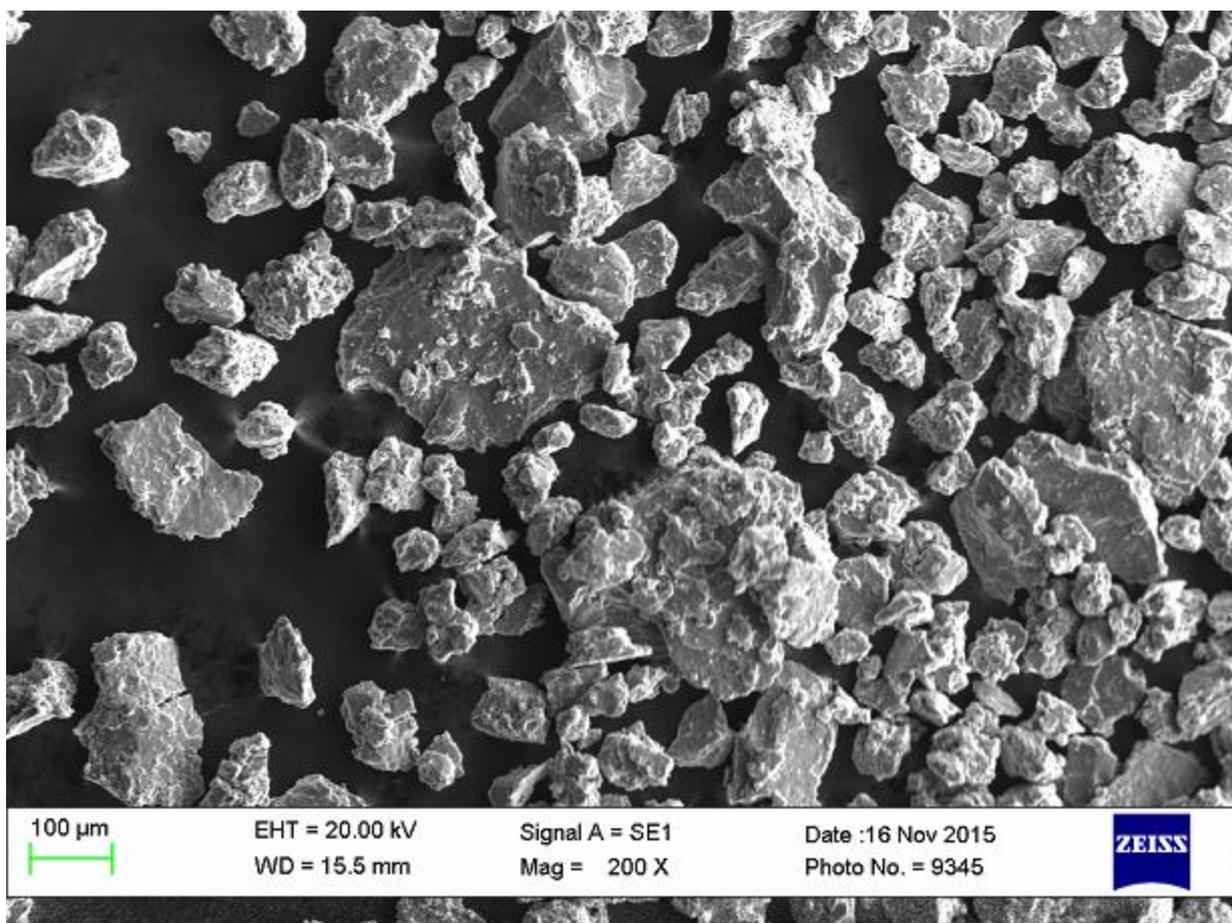
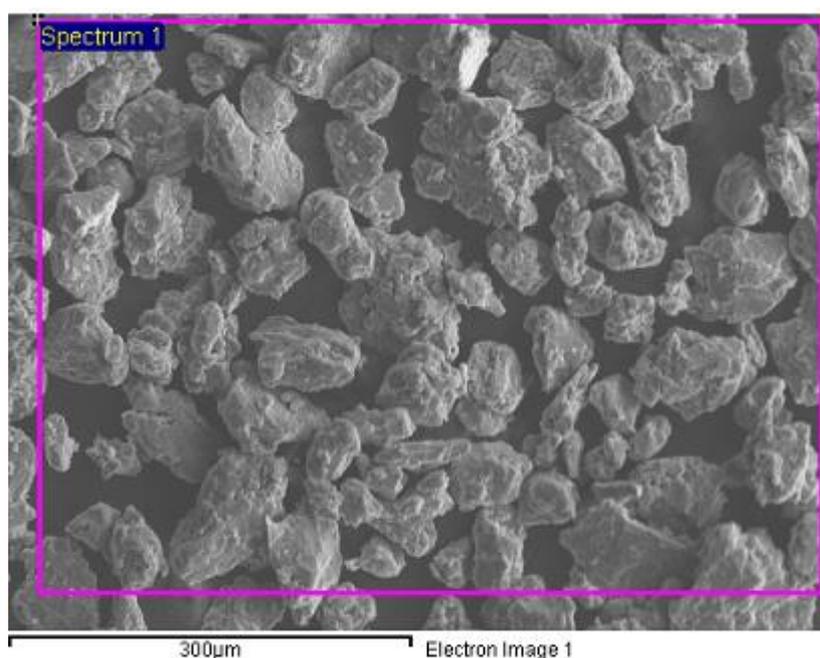
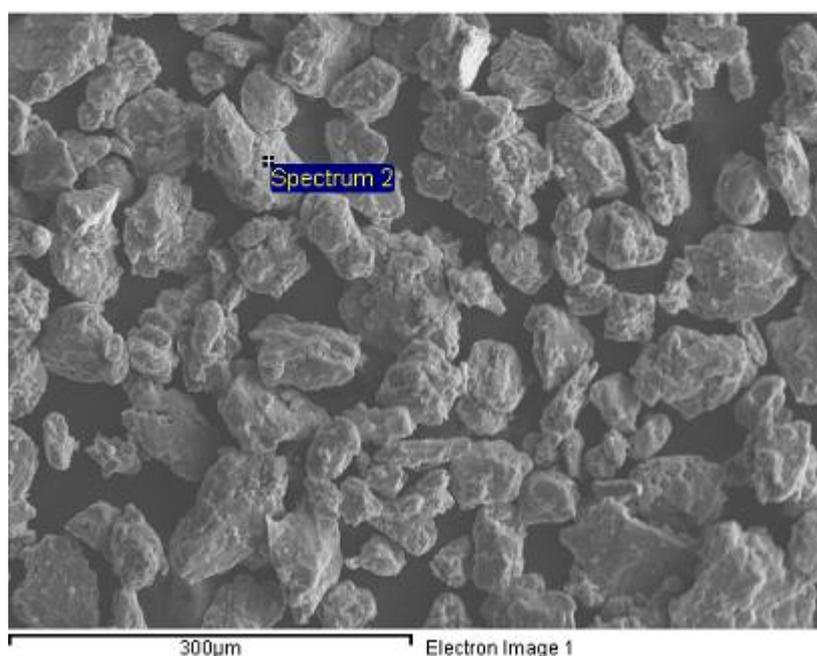


Рисунок 3.5 – Структура порошковой композиционной смеси состава 70% Al + 30% C (об. %), после 15 минут механоактивационной обработки

Элементный состав смеси состава 70% Al + 30% C (об. %) представлен на рисунке 3.6, который также позволяет судить об отсутствии окислов в механокомпозите.



Спектр 1 (по площади)	
Элемент	Весовой %
C	29,51
Al	70,49



Спектр 2 (в микроточке)	
Элемент	Весовой %
C	24,00
Al	76,00

Рисунок 3.6 – Энергодисперсионный анализ порошковой композиционной смеси состава 70% Al + 30% C (об. %), после 15 минут механоактивационной обработки

Таким образом, исходя из анализа морфологии и элементного состава механокомпозита, рациональным временем механоактивации для создания композиционной смеси с содержанием 30 % об. углерода следует считать 7 минут (рисунок 3.3-3.4).

После исследования морфологии и установления элементного состава композиционной смеси было проведено изучение ее фазового состояния [136, 137]. На рисунке 3.7 приведены результаты исследования фазового состава полученной алюмоматричной композиционной смеси 70% Al + 30% C (об. %) после 7 минут механоактивации.

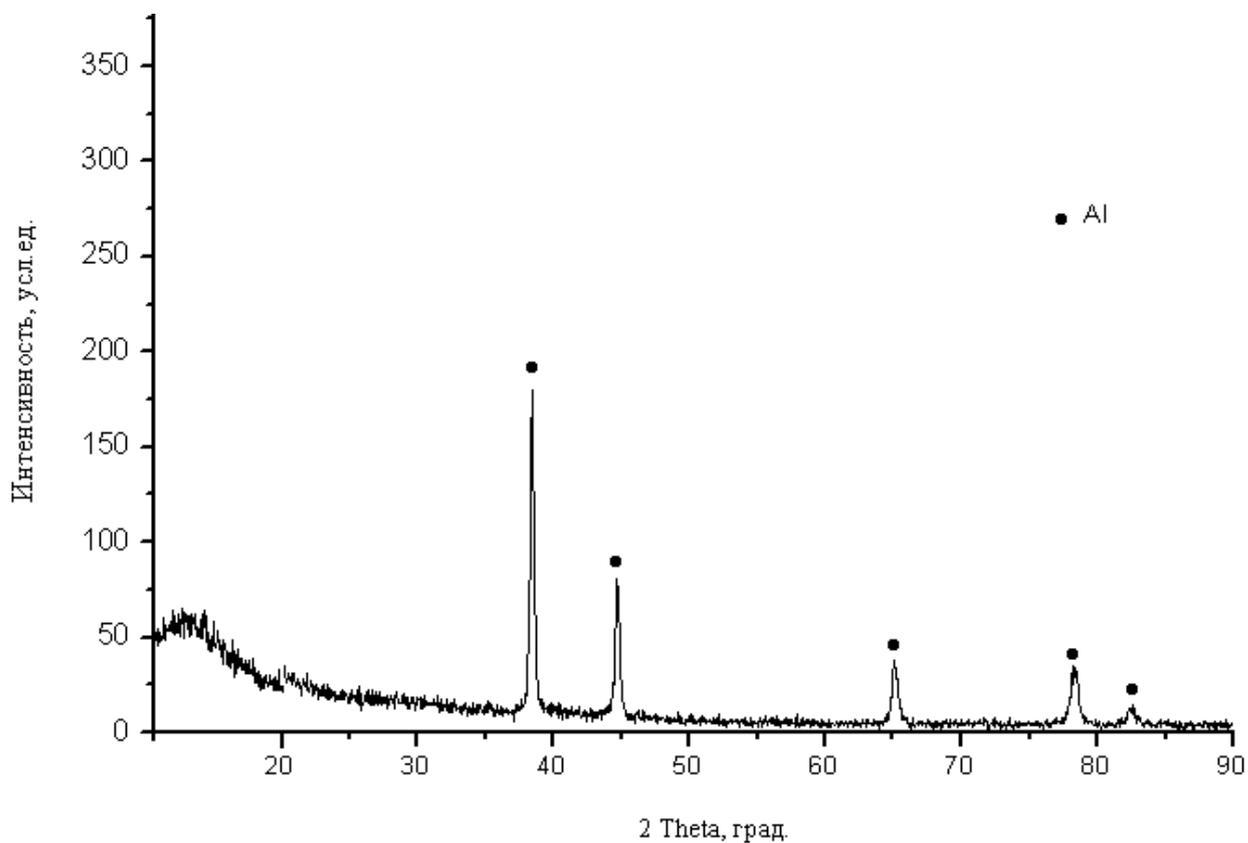


Рисунок 3.7 – Дифрактограмма порошковой композиционной смеси состава 70% Al + 30% C (об. %) после 7 минут механоактивации

В таблице 3.1 приведено сравнение параметров экспериментальных и эталонных дифракционных максимумов алюминия (снято на CuK α -излучении ($\lambda=1.5418 \text{ \AA}$), соответствует рисунку 3.7).

Таблица 3.1 - Сравнение параметров экспериментальных и эталонных дифракционных максимумов Al

(HKL)	Экспериментальные значения Al		Эталонные значения Al по (4-787) Natl. Bur. Stand (U.S.), Circ.539, Swanson, Tatge., I, 11, 1953 (База данных порошковой дифрактометрии PD Win 3.0).	
	2Theta, град.	d, Å	2Theta, град.	d, Å
(111)	38.41	2.343	38.47	2.338
(200)	44.68	2.025	44.73	2.024
(220)	65.09	1.432	65.13	1.431
(311)	78.21	1.222	78.22	1.221
(222)	82.41	1.169	82.43	1.169

Как видно на рисунке 3.7, после механоактивационной обработки порошковой смеси «Al+C» в течении 7 минут углерод полностью переходит в рентгеноаморфное состояние, о чем свидетельствует наличие аморфного «галла» на малых углах и полностью исчезнувшие пики углерода. Однако растворения углерода в алюминии не происходит (на дифрактограмме пики алюминия – узкие, симметричные, без смещения, параметр решетки сохраняется, что подтверждается данными таблицы 3.1), химических соединений также не образуется.

Объяснить исчезновение пиков углерода можно следующим [136, 137].

Алюминий более пластичен, частицы графита чувствительнее к механическим нагрузкам. 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. Данная гипотеза подтверждается данными электронной микроскопии (рисунки 3.1 – 3.6).

3.2 Исследование структурного состояния композиционной порошковой смеси состава «алюминий – фуллерен» после механической активации

В течение установленного на предыдущем этапе рационального времени механоактивационной обработки были проведены исследования на других составах порошковой смеси. Морфология композиционной смеси с содержанием фуллерена C_{60} , вводимого в состав шихты вместо литейного углерода, представлена на рисунке 3.8.

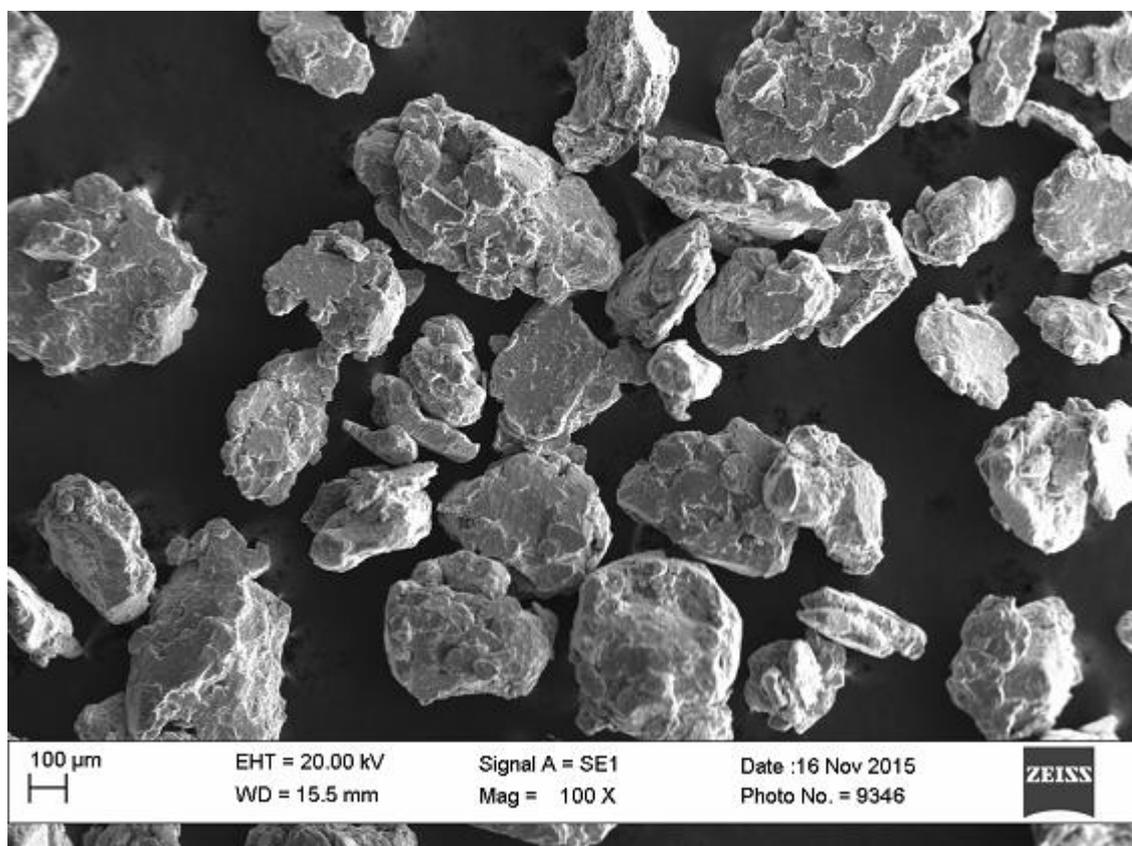
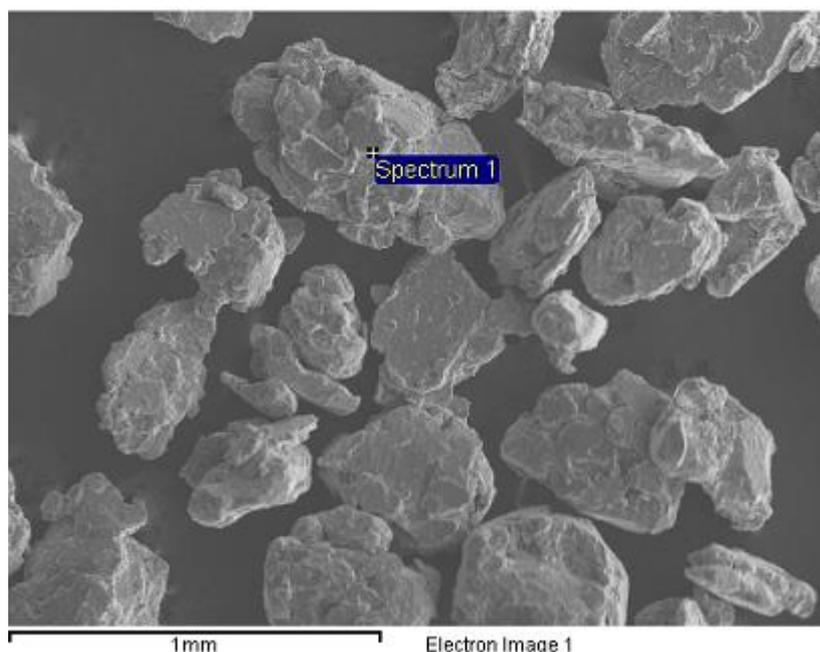


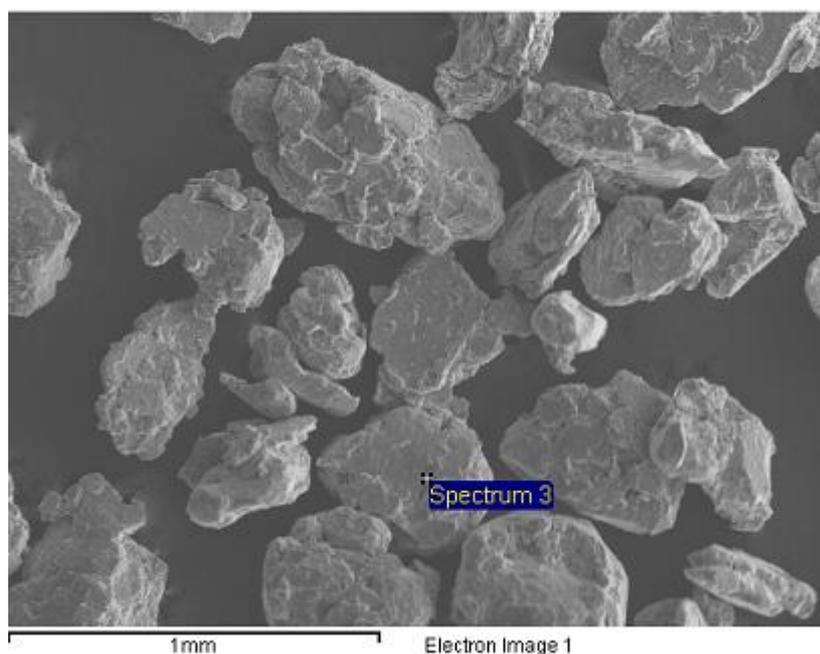
Рисунок 3.8 – Структура порошковой композиционной смеси состава 70% Al + 30% C_{60} (об. %), после 7 минут механоактивационной обработки

В результате механической активации данной порошковой смеси также образуется композиционная смесь без присутствия частиц исходных компонентов.

Элементный состав смеси состава 70% Al + 30% C₆₀ (об. %) представлен на рисунке 3.9:



Спектр 1 (в микроточке)	
Элемент	Весовой %
C	22,74
Al	87,26



Спектр 3 (в микроточке)	
Элемент	Весовой %
C	19,21
Al	80,79

Рисунок 3.9 – Энергодисперсионный анализ порошковой композиционной смеси состава 70% Al + 30% C₆₀ (об. %), после 7 минут механоактивационной обработки

Как и в случае механоактивации смеси «алюминий – углерод» (рисунки 3.2, 3.4, 3.6), в составе 70% Al + 30% C₆₀ (об. %) после механической активации также не зафиксировано окислительных процессов.

Рентгенофазовый анализ смеси состава 70% Al + 30% C₆₀ (об. %) представлен на рисунке 3.10. Аналогично предыдущему составу (раздел 3.1) зафиксирован переход фуллерена в рентгеноаморфное состояние без растворения C₆₀ в решетке алюминия [136, 137].

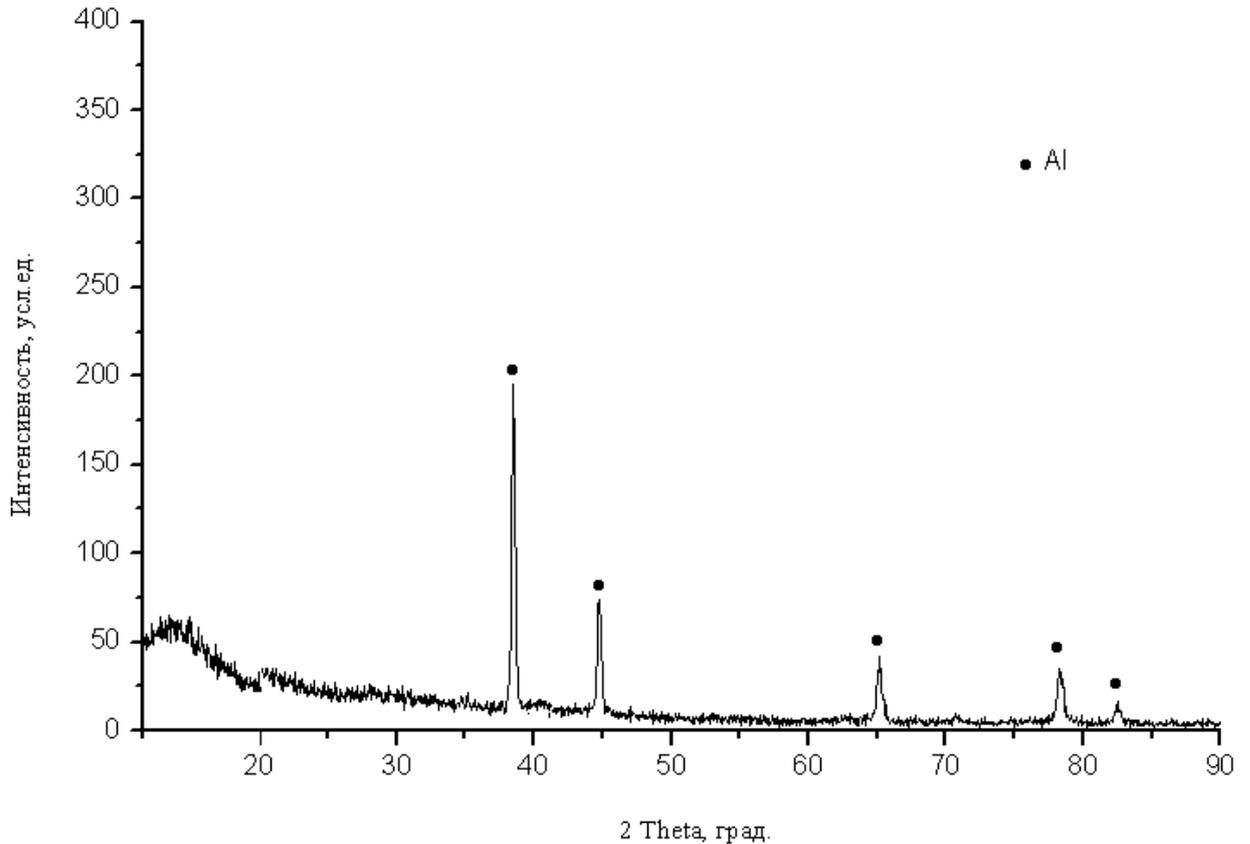


Рисунок 3.10 – Дифрактограмма порошковой композиционной смеси состава 70% Al + 30% C₆₀ (об. %) после 7 минут механоактивации

В таблице 3.2 приведено сравнение параметров экспериментальных и эталонных дифракционных максимумов алюминия (снято на CuK α -излучении ($\lambda=1.5418 \text{ \AA}$), соответствует рисунку 3.10).

Таблица 3.2 - Сравнение параметров экспериментальных и эталонных дифракционных максимумов Al

(HKL)	Экспериментальные значения Al		Эталонные значения Al по (4-787) Natl. Bur. Stand (U.S.), Circ.539, Swanson, Tatge., I, 11, 1953 (База данных порошковой дифрактометрии PD Win 3.0).	
	2Theta, град.	d, Å	2Theta, град.	d, Å
(111)	38.40	2.342	38.47	2.338
(200)	44.67	2.026	44.73	2.024
(220)	65.08	1.433	65.13	1.431
(311)	78.22	1.221	78.22	1.221
(222)	82.40	1.169	82.43	1.169

Аморфную структуру материала можно охарактеризовать отсутствием дальнего порядка в кристаллической структуре атомов. Из-за этого в материале отсутствует явление кристаллической анизотропии, нет границ блоков, зерен и других дефектов, которые характерны для структуры поликристаллических материалов. На стабильность аморфной структуры наибольшее влияние оказывает кремний и бор, при этом, наибольшую прочность и износостойкость в этом случае имеют сплавы с бором и углеродом.

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 высо-

ким противоизносным и антифрикционным свойствам, как это было отмечено, например, в работе [138]. Поэтому в дальнейшем в состав исходной порошковой смеси дополнительно вводилось некоторое количество карбида бора (порядка 1...1,5 % по объему смеси).

3.3 Исследование структурного состояния композиционной порошковой смеси состава «алюминий – углерод/фуллерен – карбид бора» после механической активации

Морфология композиционной смеси состава 70% Al + 30% C (об. %) с дополнительным введением в состав порядка 1...1,5 % карбида бора представлена на рисунке 3.10. Видимых отличий от композиционной смеси без карбида бора не наблюдается (раздел 3.1).

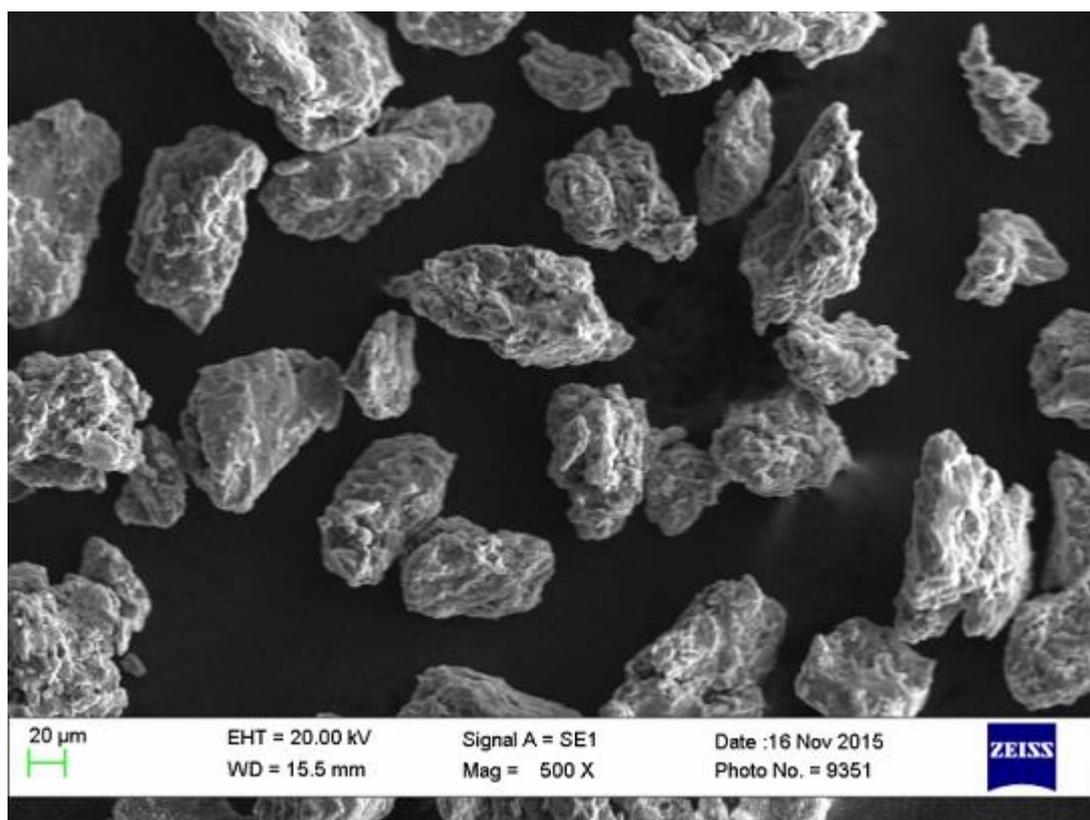
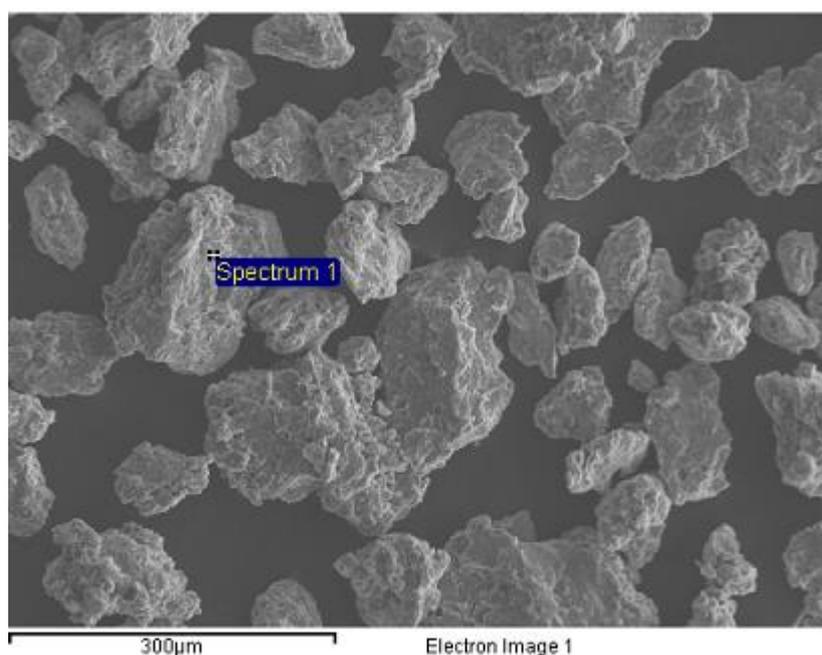
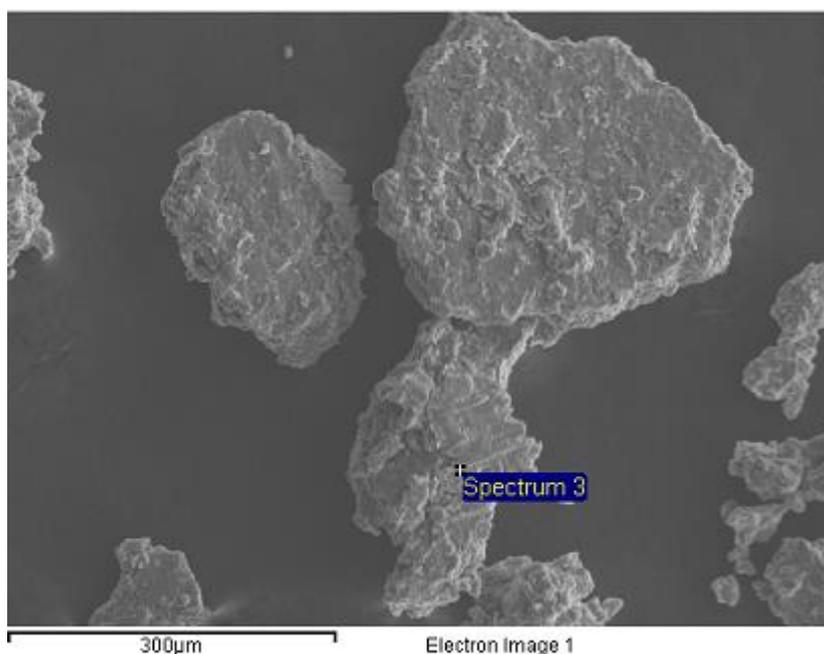


Рисунок 3.11 – Структура порошковых компонентов смеси состава 70% Al + 30% C (об. %) + B₄C, после 7 минут механоактивационной обработки

Элементный состав смеси состава 70% Al + 30% C (об. %) + B_4C представлен на рисунке 3.12. Как видно на приведенном изображении, карбид бора распределен по частицам механокомпозита неравномерно.



Спектр 1 (в микроточке)	
Элемент	Весовой %
B	6,26
C	23,85
Al	67,89



Спектр 3 (в микроточке)	
Элемент	Весовой %
B	0,00
C	16,34
Al	83,66

Рисунок 3.12 – Энергодисперсионный анализ порошковой композиционной смеси состава 70% Al + 30% C (об. %) + B_4C , после 7 минут механоактивационной обработки

Морфология композиционной порошковой смеси состава 70% Al + 30% C_{60} (об. %) + B_4C после воздействия механической активации приведена

на рисунке 3.13. Аналогично предыдущим исследованиям, композиционная смесь обладает слоистой структурой, характерной для порошковых смесей, подверженных механической активации в течение продолжительного времени.

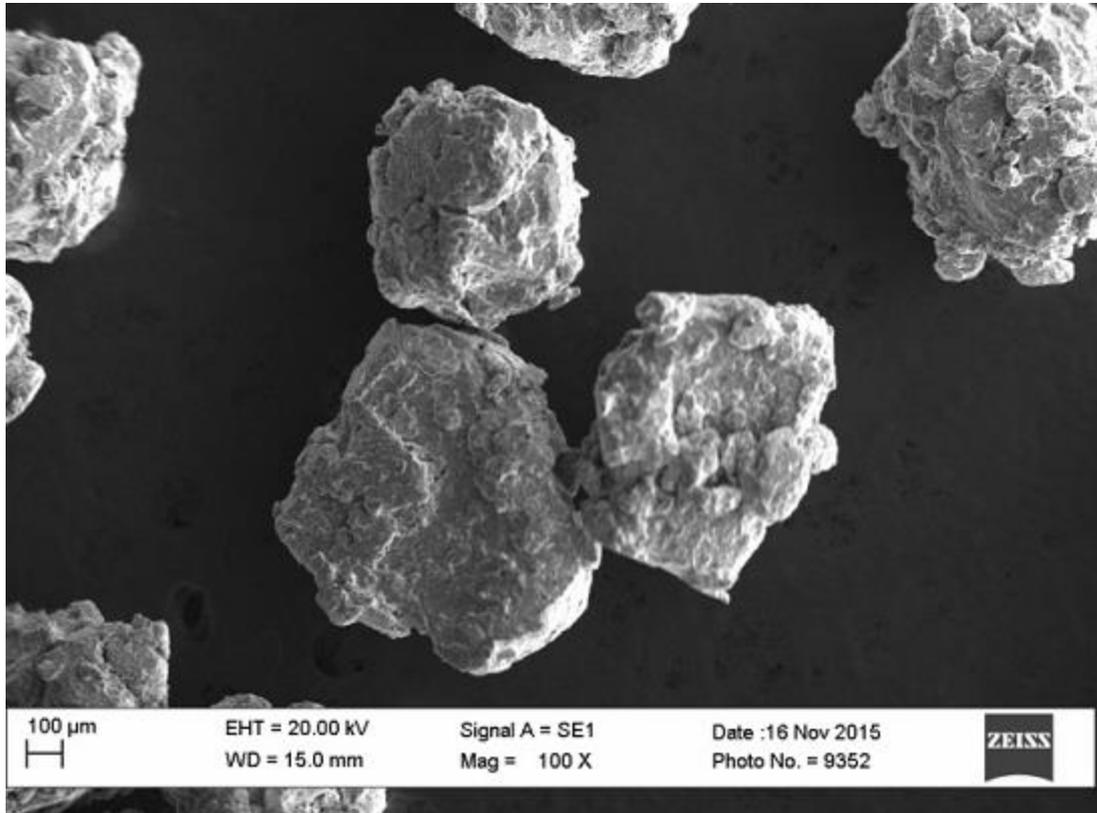
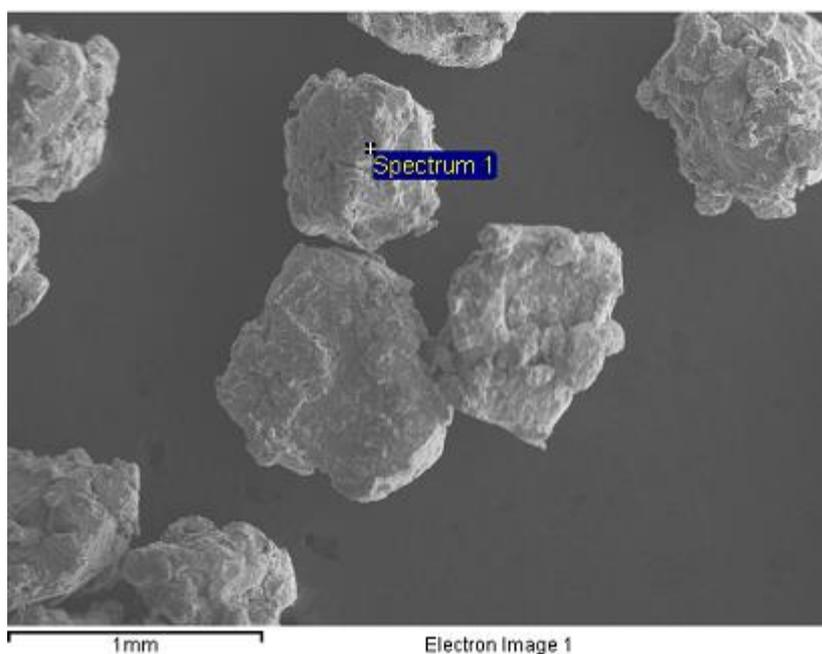
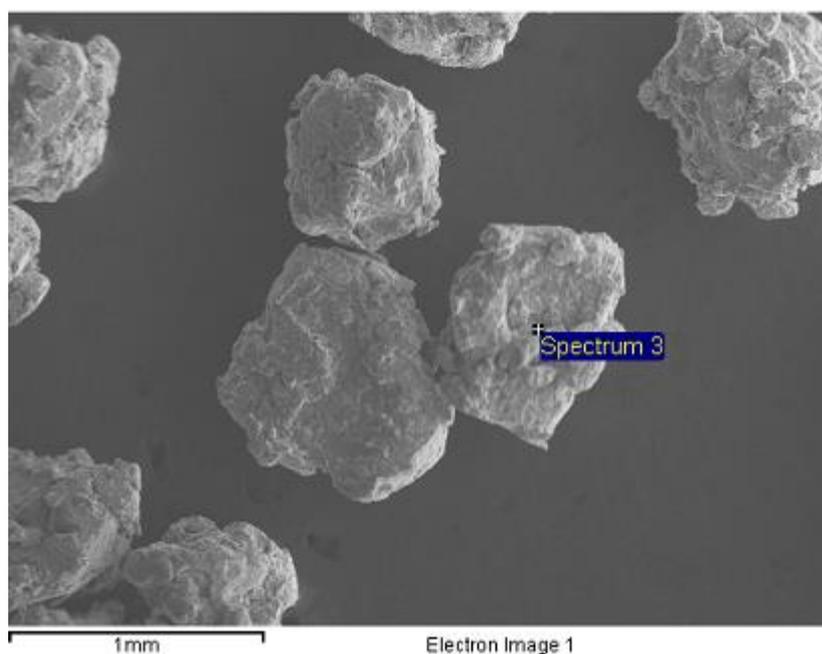


Рисунок 3.13 – Структура порошковых компонентов смеси состава 70% Al + 30% C₆₀ (об. %) + V₄C, после 7 минут механоактивационной обработки

Элементный состав смеси состава 70% Al + 30% C₆₀ (об. %) + V₄C представлен на рисунке 3.14.



Спектр 1 (в микроточке)	
Элемент	Весовой %
В	6,75
С	16,34
Al	76,19



Спектр 3 (в микроточке)	
Элемент	Весовой %
В	2,40
С	32,54
Al	63,37

Рисунок 3.14 – Энергодисперсионный анализ порошковой композиционной смеси состава 70% Al + 30% C₆₀ (об. %) + В₄С, после 7 минут механоактивационной обработки

Дифрактограммы композиционной порошковой смеси состава 70% Al + 30% С + В₄С и состава 70% Al + 30% С₆₀ (об. %) + В₄С после механической активации представлены на рисунках 3.15 и 3.16 соответственно, на которых

видно, что карбид бора хорошо способствует аморфизации композиционной порошковой смеси [136, 137].

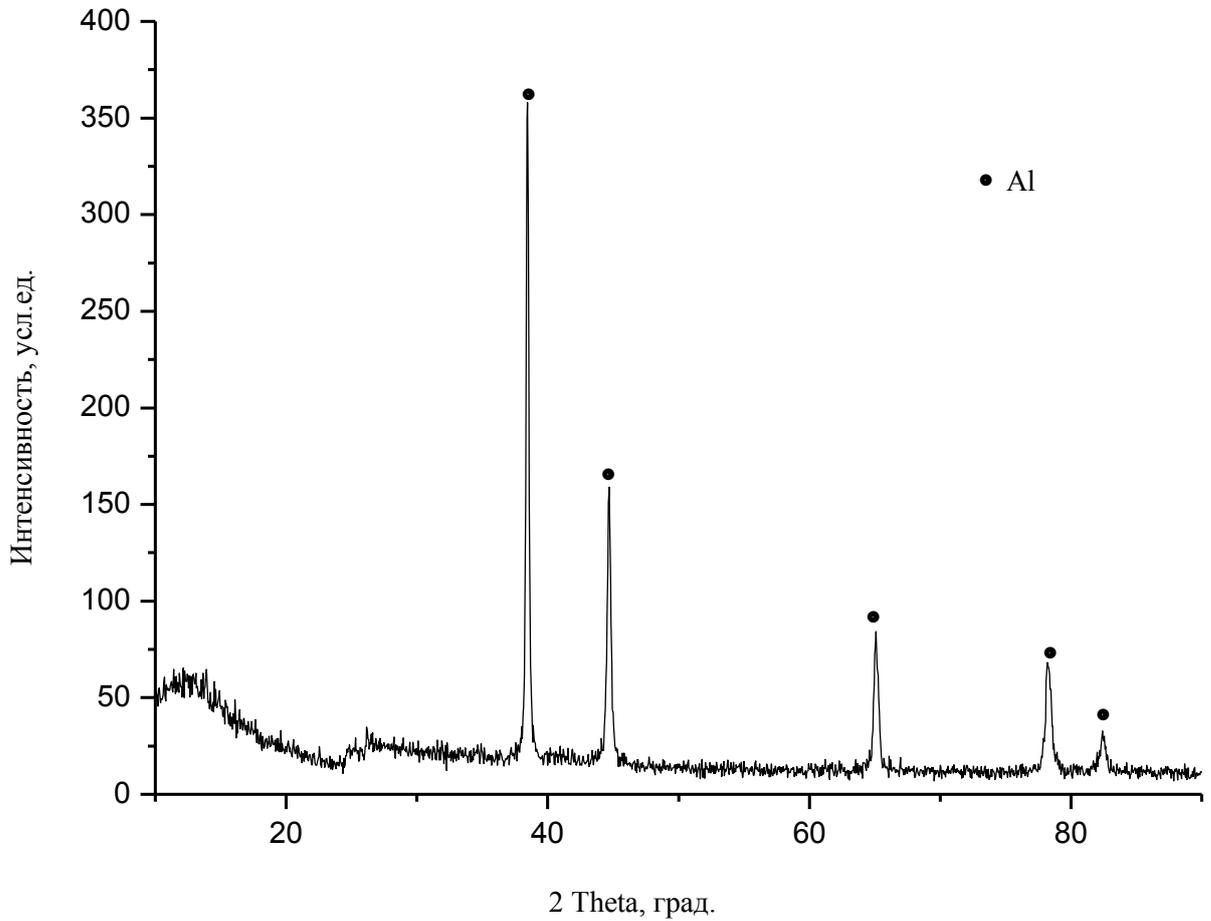


Рисунок 3.15 – Дифрактограмма порошковой композиционной смеси состава 70% Al + 30% C + B₄C после 7 минут механической активации

В таблице 3.3 приведено сравнение параметров экспериментальных и эталонных дифракционных максимумов алюминия (снято на CuK α -излучении ($\lambda=1.5418 \text{ \AA}$), соответствует рисунку 3.15).

Таблица 3.3 - Сравнение параметров экспериментальных и эталонных дифракционных максимумов Al

(HKL)	Экспериментальные значения Al		Эталонные значение Al по (4-787) Natl. Bur. Stand (U.S.), Circ.539, Swanson, Tatge., I, 11, 1953 (База данных порошковой дифрактометрии PD Win 3.0).	
	2Theta, град.	d, А	2Theta, град.	d, А
(111)	38.42	2.341	38.47	2.338
(200)	44.67	2.026	44.73	2.024
(220)	65.09	1.432	65.13	1.431
(311)	78.18	1.221	78.22	1.221
(222)	82.42	1.169	82.43	1.169

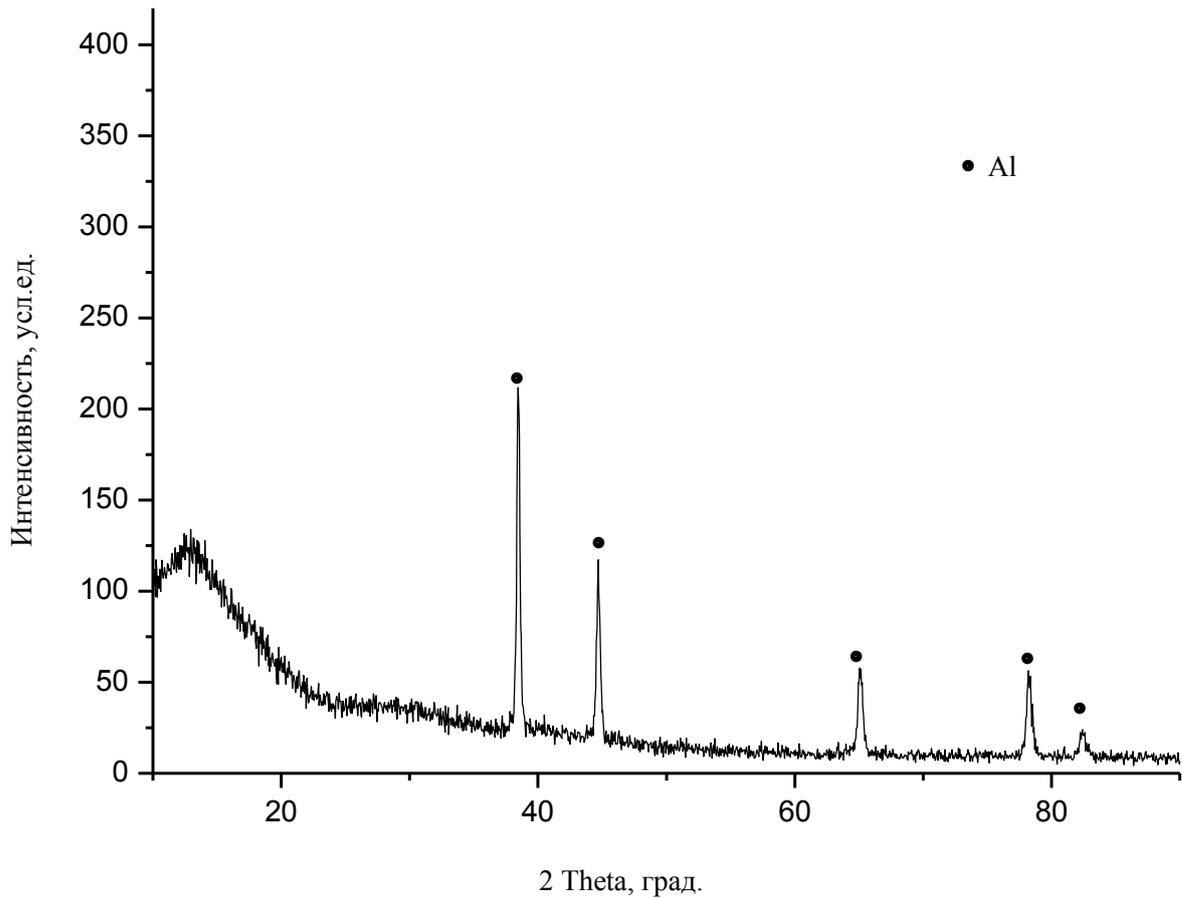


Рисунок 3.16 – Дифрактограмма порошковой композиционной смеси состава 70% Al + 30% C₆₀ + V₄C после 7 минут механической активации

В таблице 3.4 приведено сравнение параметров экспериментальных и эталонных дифракционных максимумов алюминия (снято на CuKa-излучении ($\lambda=1.5418 \text{ \AA}$), соответствует рисунку 3.16).

Таблица 3.4 - Сравнение параметров экспериментальных и эталонных дифракционных максимумов Al

(HKL)	Экспериментальные значения Al		Эталонные значения Al по (4-787) Natl. Bur. Stand (U.S.), Circ.539, Swanson, Tatge., I, 11, 1953 (База данных порошковой дифрактометрии PD Win 3.0).	
	2Theta, град.	d, Å	2Theta, град.	d, Å
(111)	38.40	2.342	38.47	2.338
(200)	44.66	2.027	44.73	2.024
(220)	65.10	1.431	65.13	1.431
(311)	78.20	1.221	78.22	1.221
(222)	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 [135-138]:

1) состав № 1: композиционная порошковая смесь 70% Al + 30% C₆₀ + В₄С после 7 минут механической активации;

2) состав № 2: композиционная порошковая смесь 70% Al + 30% C + В₄С после 7 минут механической активации.

3.4 Выводы по главе

1. Морфология смесей составов 70% Al + 30% C (об. %) и 70% Al + 30% C₆₀ (об. %) после 7 минут механоактивационной обработки имеет выра-

женную 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 100...150 мкм, что является приемлемым для детонационного напыления.

2. Анализ элементного состава композиционных порошковых смесей позволяет констатировать, что окисления алюминия в процессе механической обработки не происходит.

3. После механоактивации составов «алюминий – углерод» и «алюминий – фуллерен» углеродная составляющая композиционной смеси полностью переходит в рентгеноаморфное состояние, о чем свидетельствует наличие аморфного «галло» на малых углах и полностью исчезнувшие пики углерода / фуллерена. Однако растворения углерода / фуллерена в алюминии не происходит (на дифрактограммах пики алюминия – узкие, симметричные, без смещения, параметр решетки сохраняется), химических соединений также не образуется. Можно предположить, что механоактивированная смесь представляет собой механокомпозит со слоевой структурой, состоящей из частиц алюминия, на которых распределен тонкий слой рентгеноаморфного углерода / фуллерена.

4. Для улучшения физико-механических свойств покрытий в состав исходной порошковой смеси дополнительно вводилось некоторое количество карбида бора (порядка 1...1,5 % по объему смеси). Видимых отличий в морфологии составов 70% Al + 30% C (об. %) + B₄C и 70% Al + 30% C₆₀ (об. %) + B₄C от композиционных смесей аналогичного состава, но без карбида бора, не наблюдается. По анализу дифрактограмм выявлено, что карбид бора хорошо способствует аморфизации композиционной порошковой смеси.

5. С учетом морфологии, энергодисперсионного анализа и дифрактограмм механокомпозитов, полученных при различных временах механиче-

ской активации и различного состава, были выделены наиболее перспективные составы для дальнейшего напыления и исследования:

а) состав № 1: композиционная порошковая смесь 70% Al + 30% C₆₀ + В₄С после 7 минут механической активации;

б) состав № 2: композиционная порошковая смесь 70% Al + 30% С + В₄С после 7 минут механической активации.

ГЛАВА 4. ГАЗОДЕТОНАЦИОННОЕ НАПЫЛЕНИЕ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УГЛЕРОДНЫМИ СТРУКТУРАМИ. МОРФОЛОГИЯ И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ

4.1 Моделирование процесса движения напыляемых частиц в стволе установки

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» (Computational Fluid Dynamics– CFD) в программном комплексе Ansys Workbench [134].

Основа создаваемой математической модели базируется на системе нестационарных уравнений Навье-Стокса в их консервативной форме.

Запись мгновенных уравнений сохранения массы и импульса (непосредственно уравнения Навье-Стокса) осуществляется с учетом следующего [134, 139].

1) Записываем уравнение неразрывности, которое представляет собой выражение закона сохранения вещества в гидро-газодинамике:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla * (\rho \mathbf{U}) = 0, \quad (4.1)$$

где

ρ – плотность газового потока,

\mathbf{U} – вектор скорости потока газа в точке, имеющей координаты (x, y, z) в определенный момент времени t.

2) Формулируем уравнение для потока импульса

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla * (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla * \tau + S_M, \quad (4.2)$$

где

$$\nabla * (\rho U \otimes U) = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x}(\rho U_x U_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho U_y U_x) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho U_z U_x) \\ \frac{\partial}{\partial x}(\rho U_x U_y) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho U_y U_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho U_z U_y) \\ \frac{\partial}{\partial x}(\rho U_x U_z) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho U_y U_z) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho U_z U_z) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

- выражение, представляющее собой тензорное произведение вектора плотности двухфазного потока на вектор его скорости,

p – давление потока,

τ – тензор напряжений,

S_M – источник импульса.

Тензор напряжений коррелирует со скоростью движения по следующей зависимости:

$$\tau = \mu(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3}\delta \nabla * U), \quad (4.4),$$

где

μ – молекулярная вязкость,

T – температура потока,

δ – дельта Кронекера.

Состояние движущегося газа характеризуется пятью величинами. Из них три компонента относятся к скорости, а две оставшиеся должны определять какие-либо термодинамические величины (к примеру, давление и плотность). В связи с этим, для описания полной системы уравнений гидродинамики необходимо использовать пять уравнений. В связи с тем, что моделируется поведение газового потока, где протекают процессы теплопроводности между отдельными слоями, а также имеет место внутреннее трение, то логично использовать в качестве первых четырех уравнений системы уравнение непрерывности и движения Навье-Стокса. Последним уравнением может стать уравнение переноса тепла. В общем виде оно выглядит следующим образом [134, 139]:

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla * (\rho U h_{tot}) = \nabla * (\lambda \nabla T) + \nabla * (U * \tau) + S_E, \quad (4.5)$$

где

S_E – источник энергии,

λ – теплопроводность,

h_{tot} – полная удельная энтальпия.

Поскольку система уравнений Навье-Стокса не является замкнутой, то ее необходимо дополнить следующими уравнениями [134, 139]:

- 1) Зависимость, описывающая плотность как функцию независимых давления и температуры:

$$\rho = \rho(p, T) \quad (4.6)$$

- 2) Зависимость, описывающая теплоемкость как функцию независимых давления и температуры:

$$c_p = c_p(p, T), \quad (4.7)$$

где

c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении.

Газовый поток в канале ствола детонационной установки можно представить как сильное турбулентное течение. В связи с этим, аналитического решения системы уравнений, описывающих такое течение, не может быть получено [134, 139]. Для использования численных методов решения необходимо воспользоваться какой-либо моделью турбулентности.

Турбулентность представляет собой флуктуации потока во времени и пространстве. Это сложный трехмерный нестационарный процесс, и он оказывает существенное влияние на характеристики потока. Турбулентность возникает, когда силы инерции в газе становятся значительно больше сил вязкости, и характеризуется высокими числами Рейнольдса. В принципе, уравнения Навье-Стокса описывают как ламинарные, так и турбулентные потоки без дополнительной информации. Однако, турбулентные потоки при реалистичных числах Рейнольдса содержат вихри, чей масштаб намного меньше, чем размер самой мелкой сетки, доступной при современном уровне

численного анализа. Потому прямое численное моделирование большинства турбулентных потоков невозможно в обозримом будущем. Для того, чтобы иметь возможность реалистичного предсказания турбулентных потоков, разрабатываются модели турбулентности. Модели турбулентности служат для учета эффектов турбулентности без использования чрезмерно мелкой сетки и прямого численного моделирования. Чаще всего модели турбулентности являются статическими.

В данном моделировании использована модель сдвиговых напряжений (Shear Stress Transport, SST) [134, 139]. Она является разновидностью моделей, осредненных по Рейльнольдсу (RANS). Данный метод заключается в замене случайно изменяющихся характеристик потока (скорость, давление, плотность) суммами осреднённых и пульсационных составляющих. SST-модель является комбинацией двух моделей – $k - \varepsilon$ модели и модели $k - \omega$.

Все $k - \omega$ модели предполагают, что турбулентная вязкость связана с кинетической энергией турбулентности следующим соотношением:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega}, \quad (4.8)$$

где

μ_t - турбулентная вязкость,

k – кинетическая энергия турбулентности,

ω – скорость диссипации турбулентной энергии.

Решаются два дополнительных транспортных уравнения: для кинетической энергии турбулентности и для скорости диссипации [134]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 \quad (4.10)$$

где

$$\beta' = 0.09,$$

$$\alpha = 5/9,$$

$$\beta = 0.075,$$

$$\sigma_{\omega}=2,$$

$$\sigma_t=2,$$

P_k отражает вклад в турбулентность вязких сил и задается следующим образом:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \left(3\mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \quad (4.11)$$

Неизвестный тензор рейльнольдсовских напряжений:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right), \quad (4.12)$$

SST-модель добавляет ограничение к формулировке вихревой вязкости:

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)}, \quad (4.13)$$

где

$$\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho}, \quad (4.14)$$

$$a_1 = \frac{5}{9},$$

S – величина скорости деформации,

F_2 – функция смешивания.

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, \quad (4.15)$$

где

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right), \quad (4.16)$$

Функция смешивания крайне важна для адекватного моделирования турбулентности [134]. Она формулируется на основе данных о расстоянии до ближайшей поверхности и на характеристиках потока:

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2), \quad (4.17)$$

где

$$\arg_2 = \max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \quad (4.18)$$

где

y – дистанция до ближайшей поверхности,

ν - кинематическая вязкость.

При исследовании горения, использовалась модель конечной скорости химических реакций. В этом случае химическая реакция горения описывается как совокупность K элементарных реакций с количеством вовлеченных компонент N_c [134]:



где

ν_{kI} – стехиометрический коэффициент для компоненты I в реакции k .

Величина выделения/поглощения тепла Q_{HL} для компоненты I вычисляется как сумма для всех элементарных реакций с ее участием:

$$Q_{HL} = W_I \sum_{K=1}^K (\nu_{\dot{k}I} - \nu_{\ddot{k}I}) R_k, \quad (4.20)$$

где

R_k – скорость развития элементарной химической реакции k .

Для инициализации процесса горения в газодетонационной установке используется искра, создаваемая свечой зажигания. Такое инициирование горения смеси задается при помощи так называемой Spark Ignition Model [134]. Использование данной модели позволяет определить время и координаты искры. Помимо этого, специальная модель нужна для описания начального роста области, подверженной воздействию свечи. Дело в том, что первоначальный размер искры слишком мал, чтобы его можно было решать на сеточной модели.

Spark Ignition Model предполагает, что регион вокруг, где происходит воспламенение, первоначально растет как шар. Во время этой фазы радиус шара r_k вычисляется через нульмерную задачу Коши. Радиус в момент зажигания t_{ignition} задается начальным объемом искры V_{initial} :

$$\frac{d}{dt} r_k(t) = \frac{\rho_u}{\rho_b} S_{T,k}, \quad (4.21)$$

где

$$r_k(t_{\text{ignite}}) = \sqrt[3]{\frac{3V_{\text{initial}}}{4\pi}}, \quad (4.22)$$

Радиус искры отображается на трехмерное поле потока путем усреднения хода реакции по так называемому фантомному региону. Фантомный регион — это шаг, радиус которого равен радиусу перехода r_{trans} , а центр совпадает с центром искры $\overline{x_{spark}}$. При расчете радиуса искры переменная для прогресса реакции задается алгебраически:

$$\bar{c} = \left(\frac{r_K}{r_{trans}} \right)^3 \text{ for } |\bar{x} - \overline{x_{spark}}| \leq r_{trans}$$

$$\bar{c} = 0 \text{ for } |\bar{x} - \overline{x_{spark}}| > r_{trans}$$

$$\bar{c} = \left(\frac{r_K}{r_{trans}} \right)^3 \text{ для } |\bar{x} - \overline{x_{spark}}| \leq r_{trans}$$

$$\bar{c} = 0 \text{ для } |\bar{x} - \overline{x_{spark}}| > r_{trans} \quad (4.23)$$

Нульмерная задача Коши решается до тех пор, пока радиус искры не достигнет радиуса перехода r_{trans} , заданного пользователем. В этот момент прерывается решение нульмерной задачи и осуществляется переход к основной модели горения.

По результатам моделирования изменение температуры порошковых частиц разных размерных групп представлено на рисунках 4.1-4.4. Приведенные изображения дают представление о температуре частиц алюмоматричной композиционной смеси на срезе ствола установки газодетонационного напыления [140, 141].

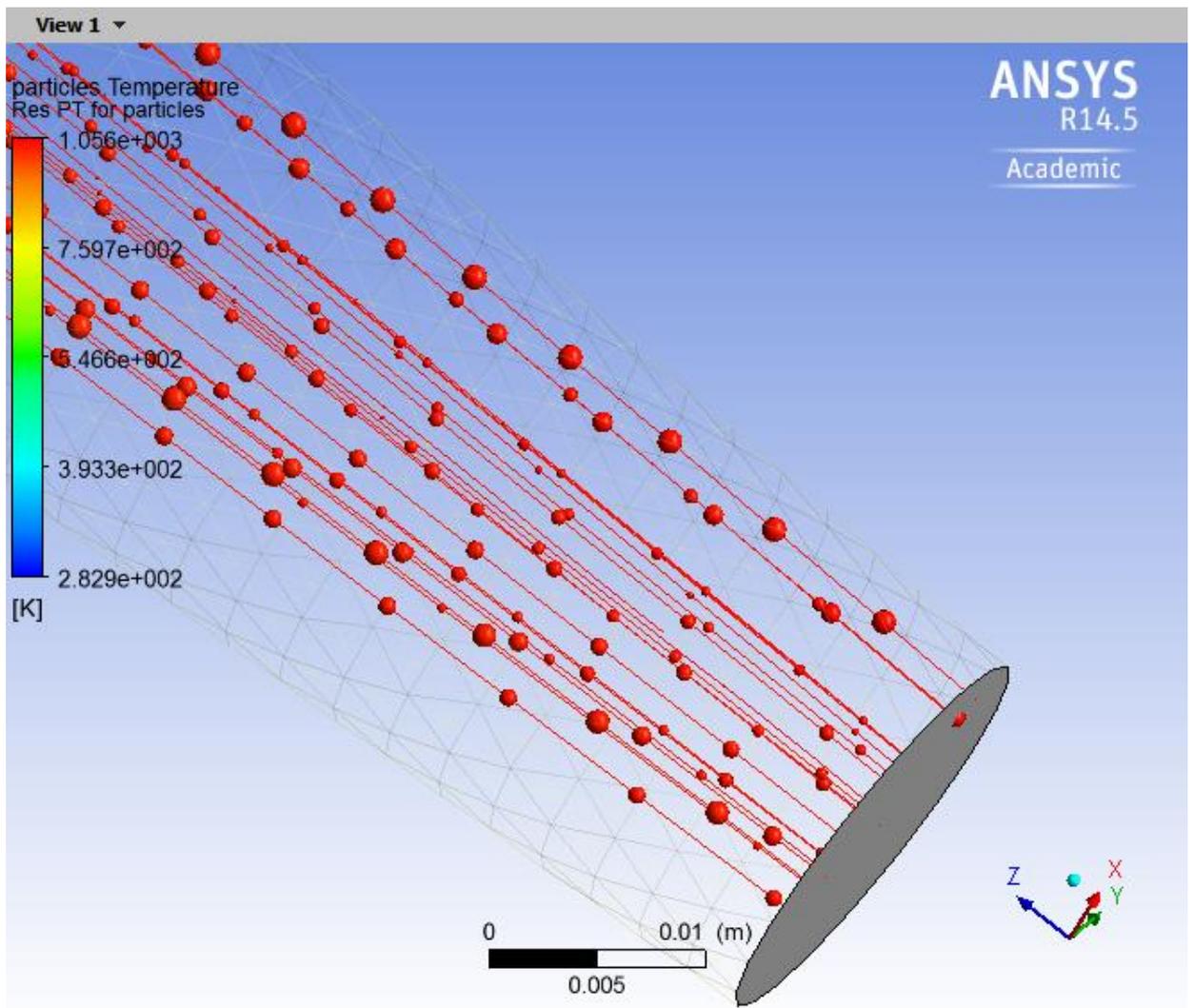


Рисунок 4.1 – Моделирование изменения температуры частиц в процессе движения по стволу газодетонационной установки, размер частиц до 40 мкм, температура превышает 1000 °С

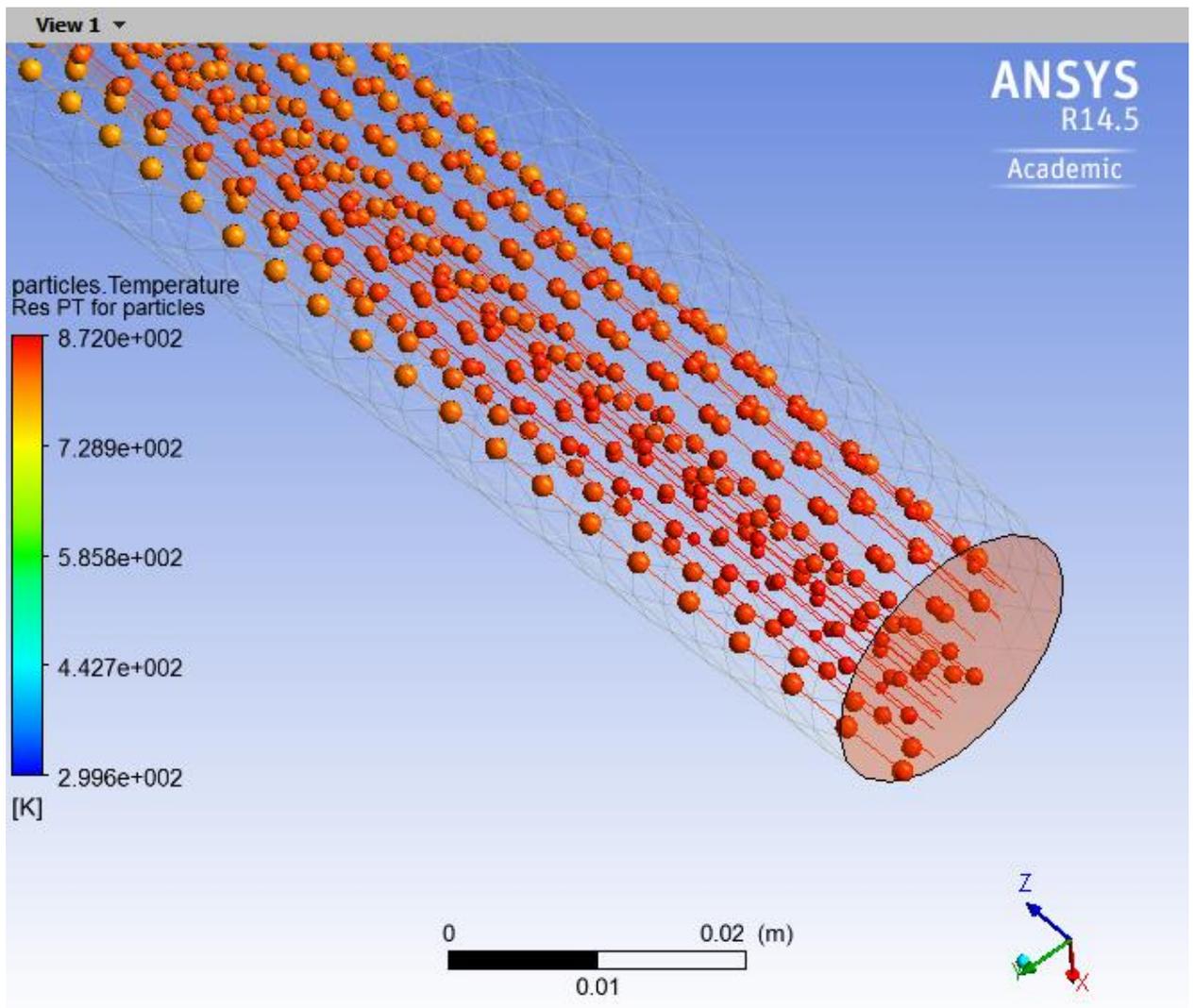


Рисунок 4.2 – Моделирование изменения температуры частиц в процессе движения по стволу газодетонационной установки, размер частиц 40...63 мкм, температура достигает 870 °С

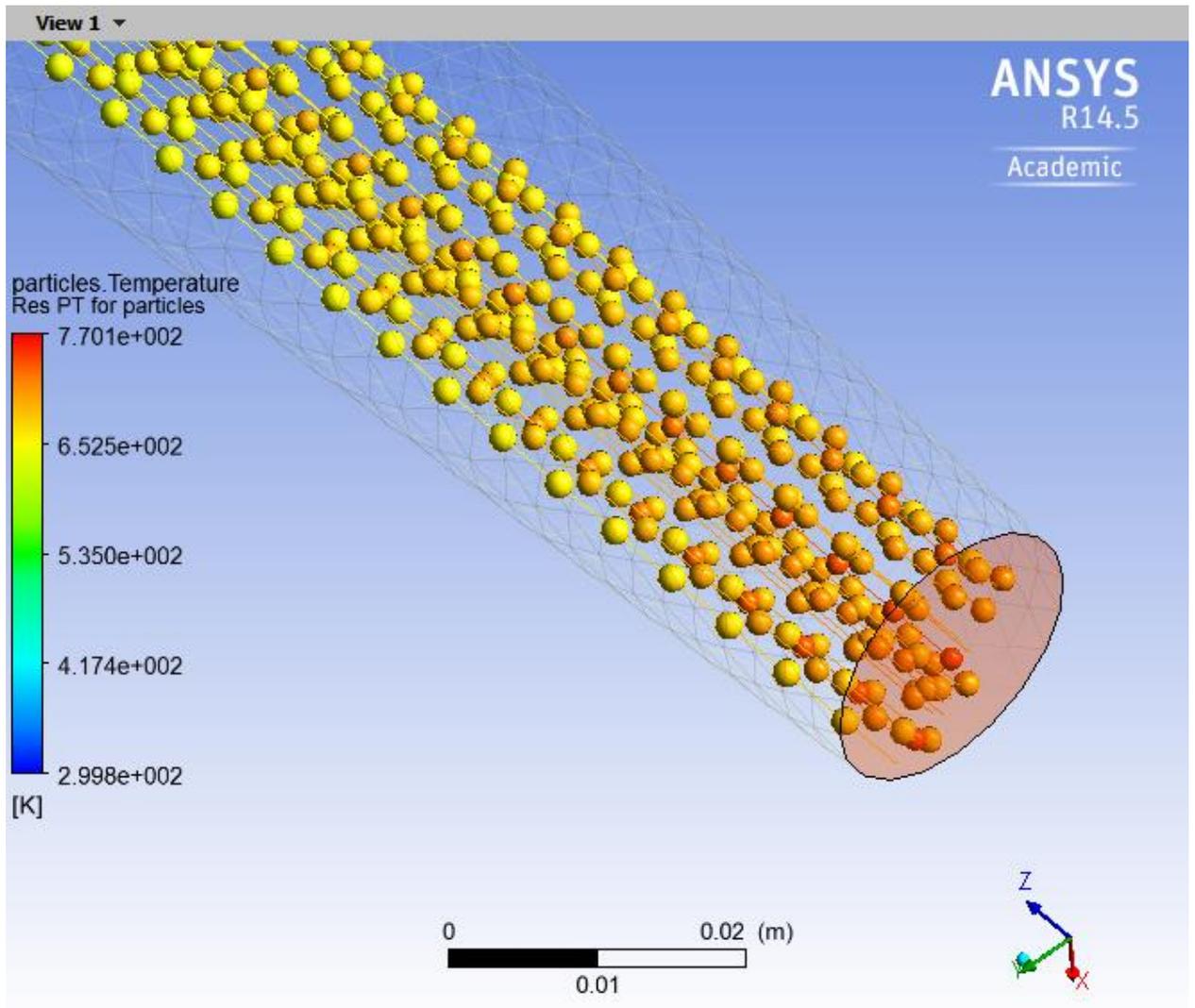


Рисунок 4.3 – Моделирование изменения температуры частиц в процессе движения по стволу газодетонационной установки, размер частиц 63...100 мкм, температура достигает 770 °С

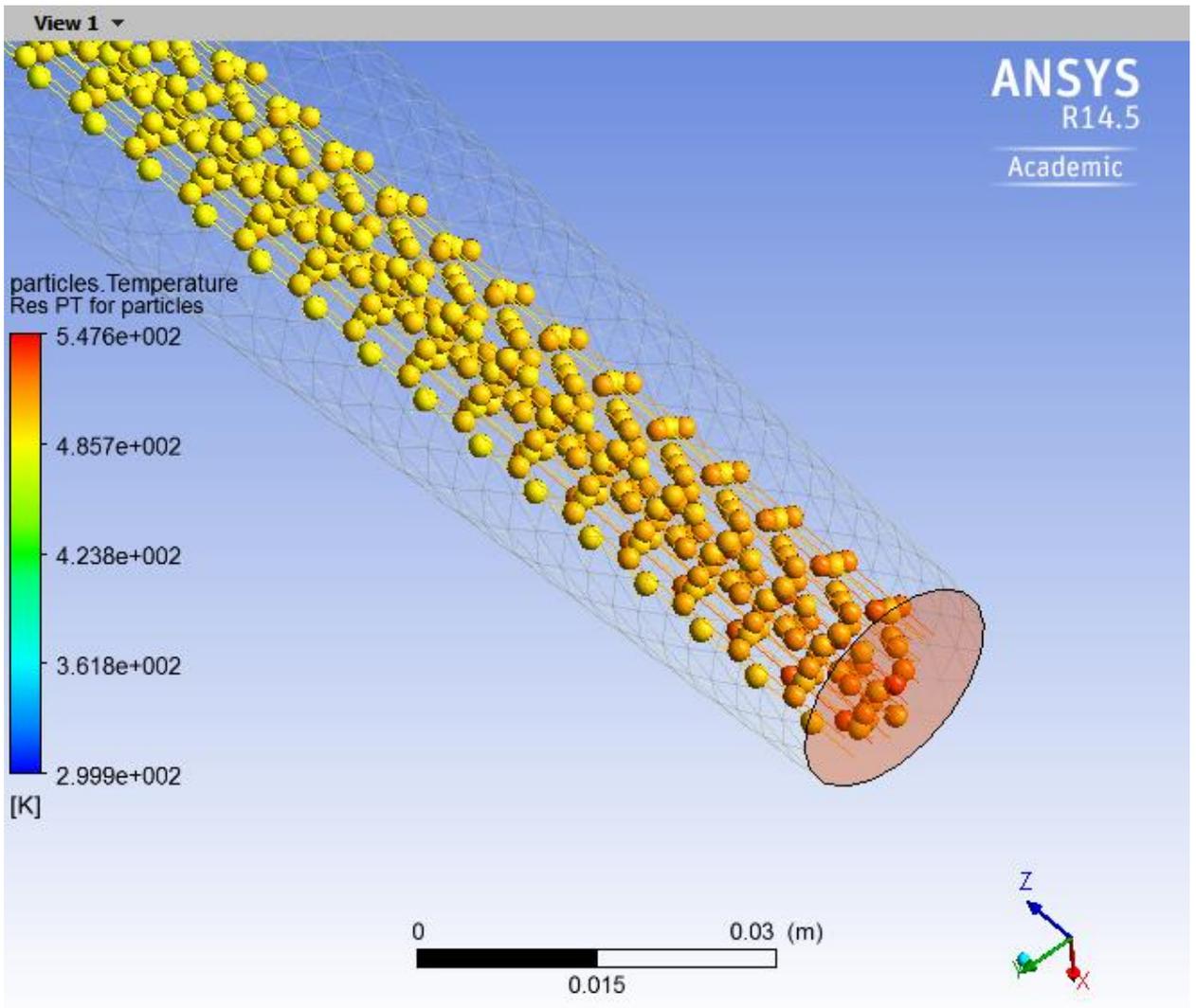


Рисунок 4.4 – Моделирование изменения температуры частиц в процессе движения по стволу газодетонационной установки, размер частиц 100...160 мкм, температура достигает 540 °С

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 [140, 141]. Данное предположение находит подтверждение и на практике – при напылении порошков фракционного состава меньше 40 мкм скорость роста толщины покрытия незначительна [125].

Результаты моделирования скорости частиц разных размерных групп в двухфазном потоке представлены на рисунках 4.5-4.8 [140, 141].

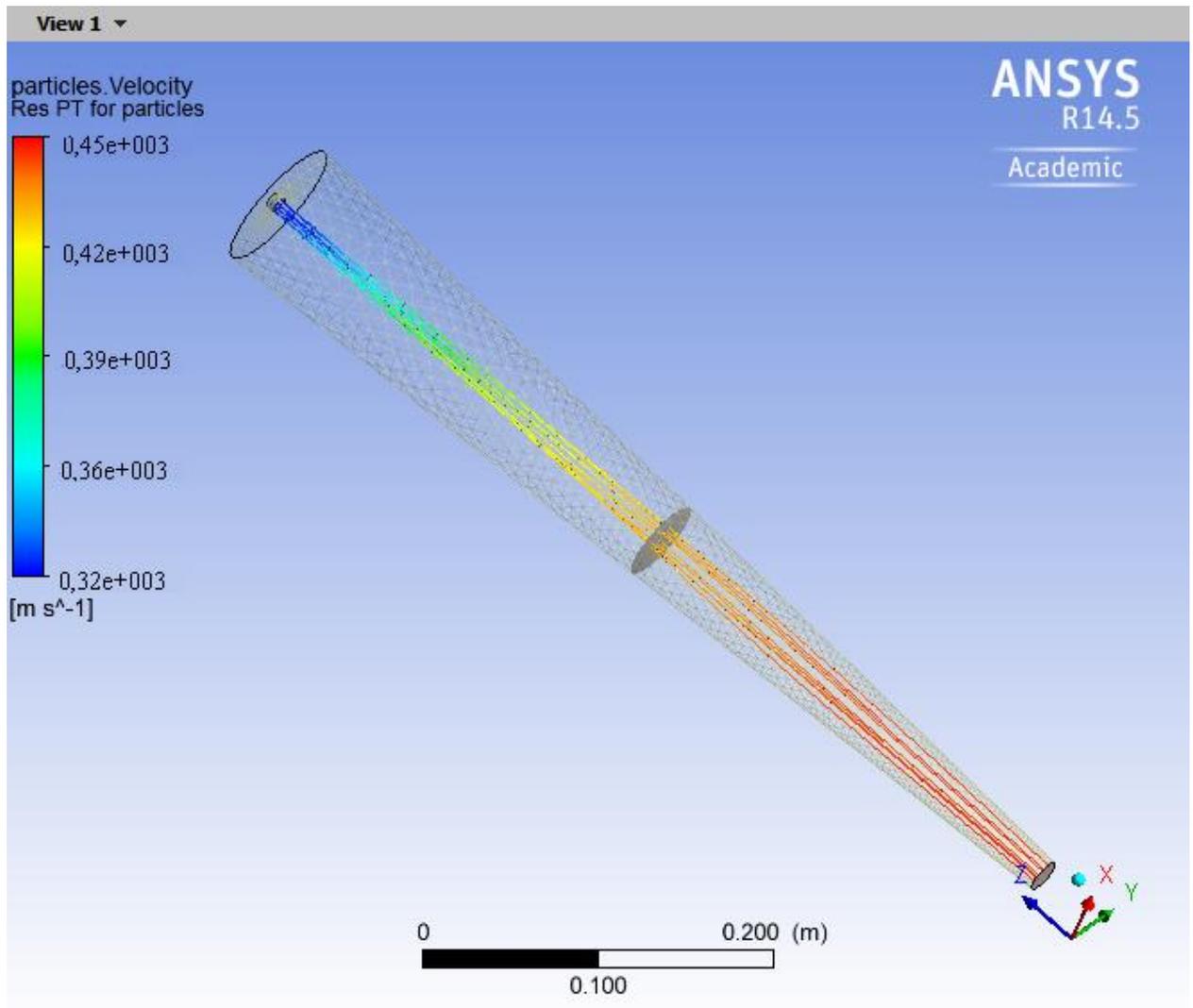


Рисунок 4.5 – Моделирование изменения скорости частиц алюмоматричного материала в процессе движения по стволу газодетонационной установки, дисперсность частиц до 40 мкм

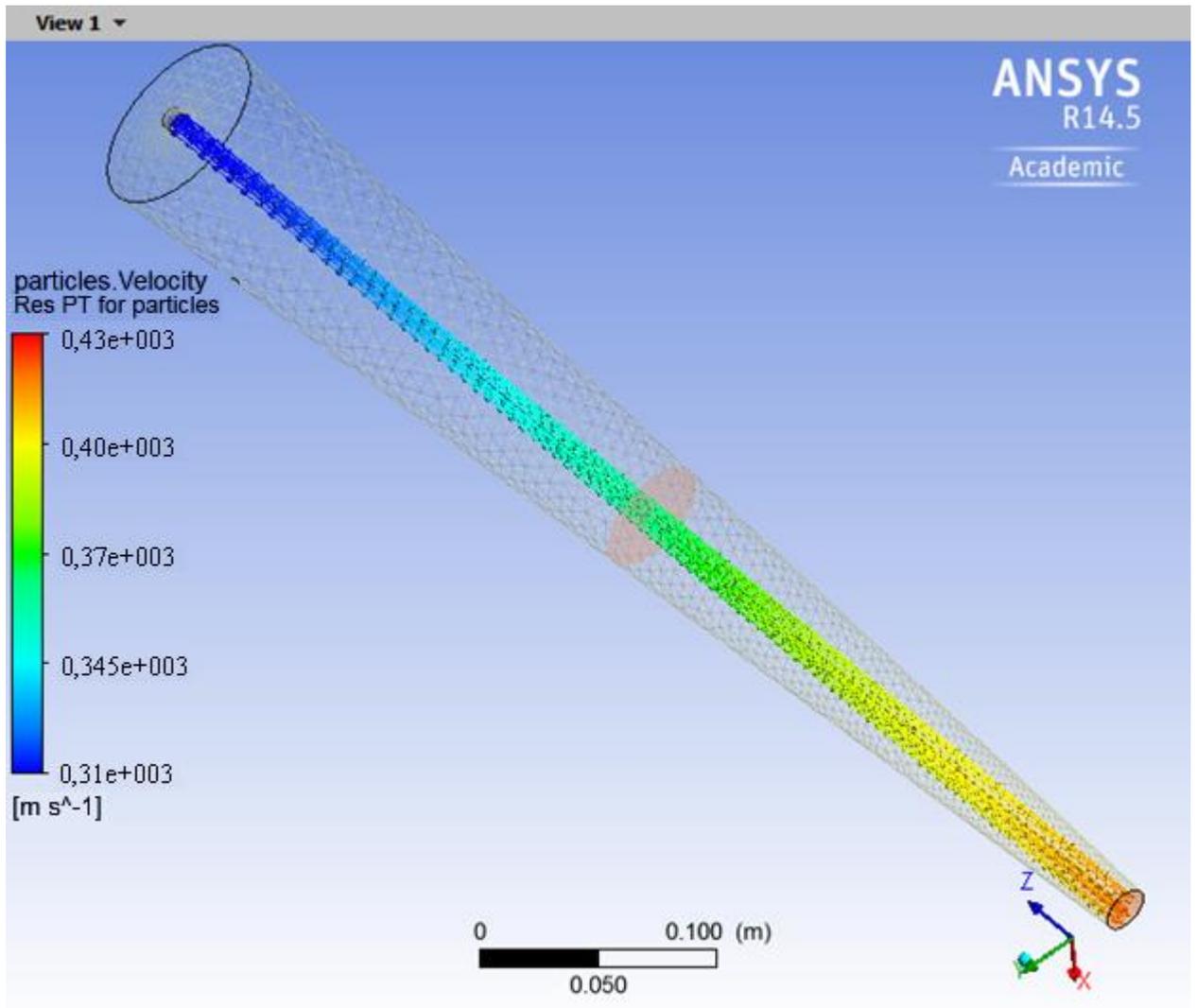


Рисунок 4.6 – Моделирование изменения скорости частиц алюмоматричного материала в процессе движения по стволу газодетонационной установки, дисперсность частиц 40...63 мкм

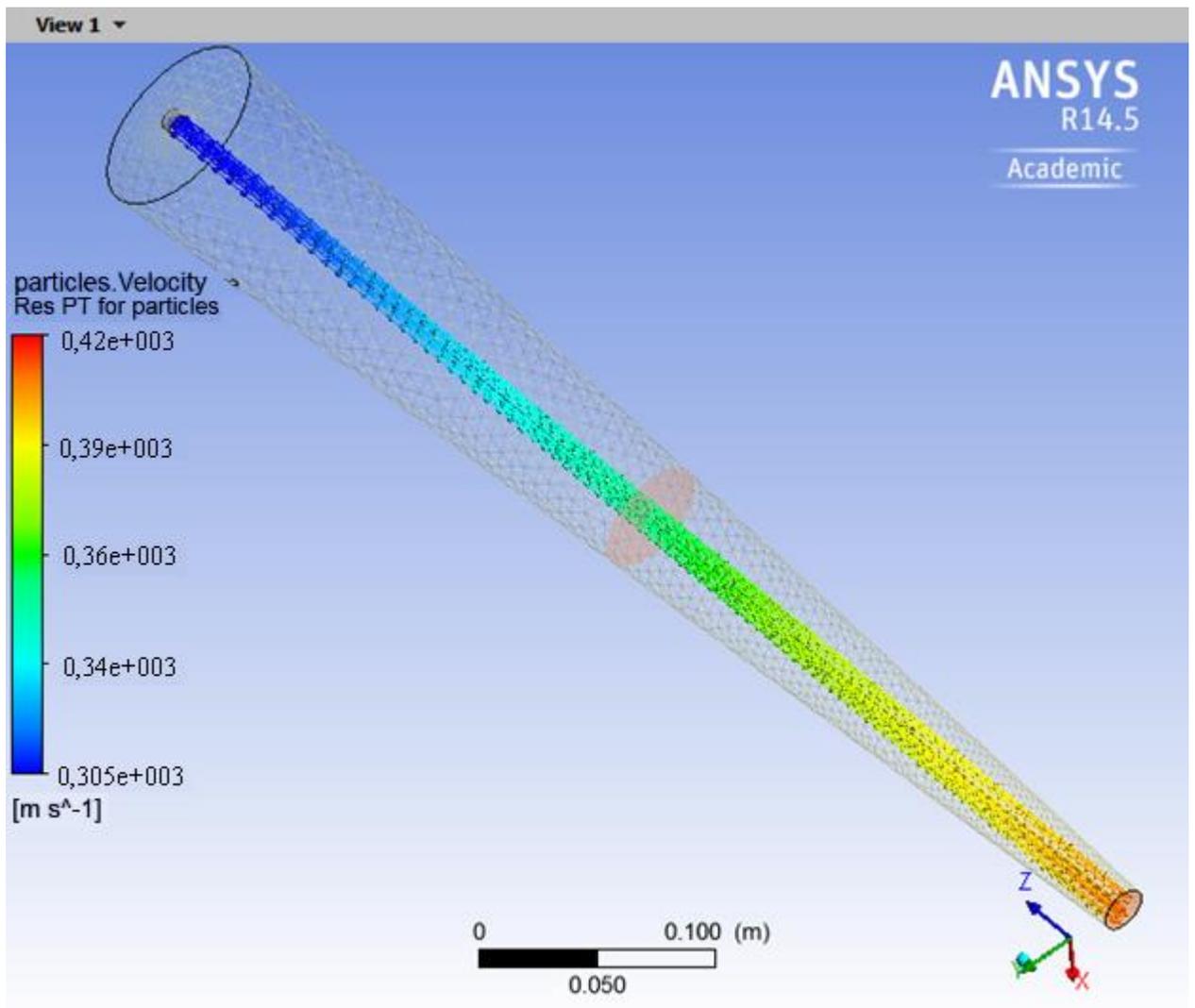


Рисунок 4.7 – Моделирование изменения скорости частиц алюмоматричного материала в процессе движения по стволу газодетонационной установки, дисперсность частиц 63...100 мкм

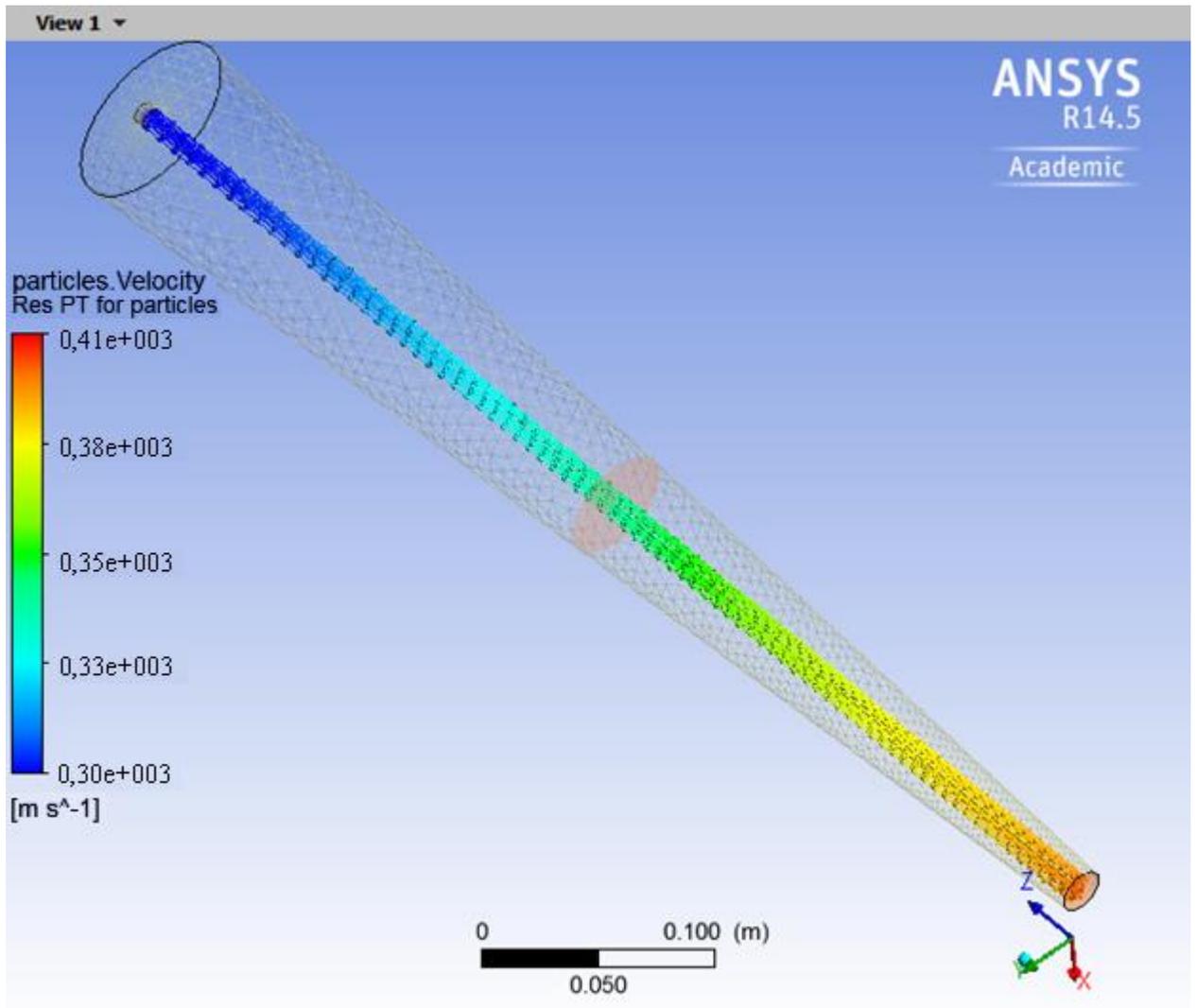


Рисунок 4.8 – Моделирование изменения скорости частиц алюмоматричного материала в процессе движения по стволу газодетонационной установки, дисперсность частиц 100...160 мкм

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 [125, 127].

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) [140, 141].

Характерные снимки движения частиц, полученные на экспериментальном стенде визуального исследования параметров потока частиц при детонационном напылении в масштабе реального времени, представлены на рисунке 4.9.



Рисунок 4.9 – Столкновение частиц напыляемого порошка с основой

Поскольку масштаб изображения и времени экспозиции ($T_{\text{нак}}=160$ мкс) известны, то рассчитывая длину трассера частицы, можно определить скорость частицы. При определении длины трассера частицы сделано допущение, что след на изображении остается от одной частицы. Усредненные расчеты по ряду изображений (рис. 4.10) показали, что скорость частиц составляет порядка 400 м/с [140, 141]. Погрешность при определении скорости частиц потока составила ориентировочно 8 %.

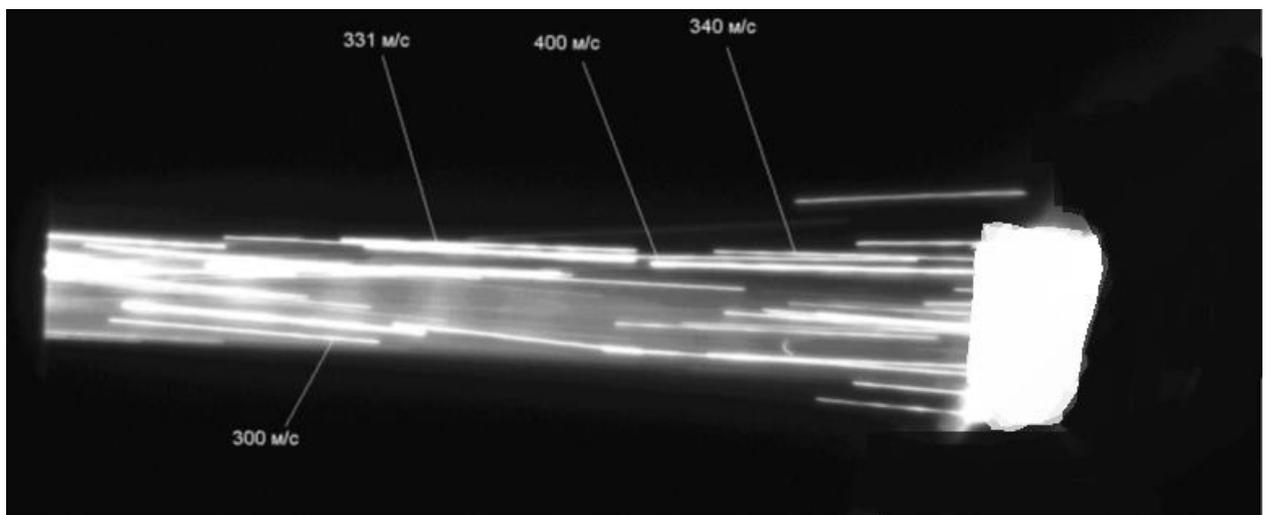


Рисунок 4.10 – Изображения треков частиц ($T_{\text{нак}}=160$ мкс, $T_k=4$ мс)

Таким образом, с помощью PTV-метода выявлена средняя скорость частиц алюмоматричного материала (400 м/с) при заданных параметрах напыления, 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.

4.2 Оптическая микроскопия газодетонационных покрытий

Структура исходного образца (рисунок 4.11) представляет собой эвтектику, содержащую первичную фазу (кремний), равномерно распределённую в алюминиевой матрице. Дендритная структура не проявляется из-за исходной термообработки сплава.

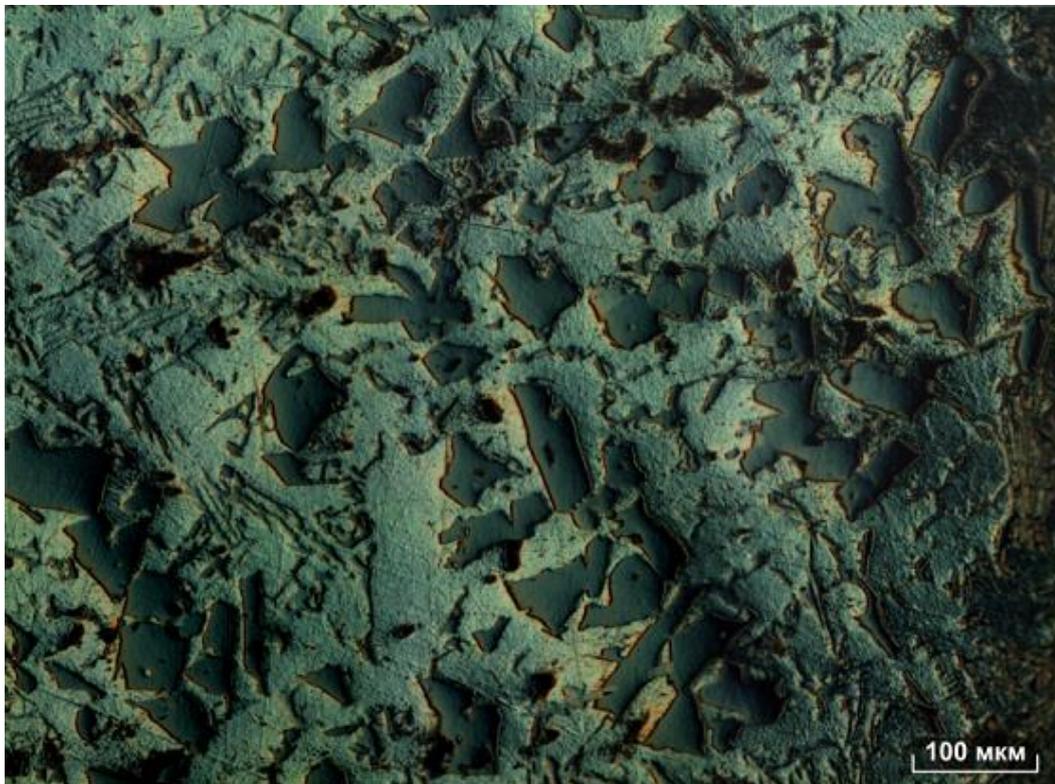


Рисунок 4.11 – Структура исходного образца (сплав АК21М2,5Н2,5), круговая поляризация (С-DIC)

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 (рисунок 4.12).

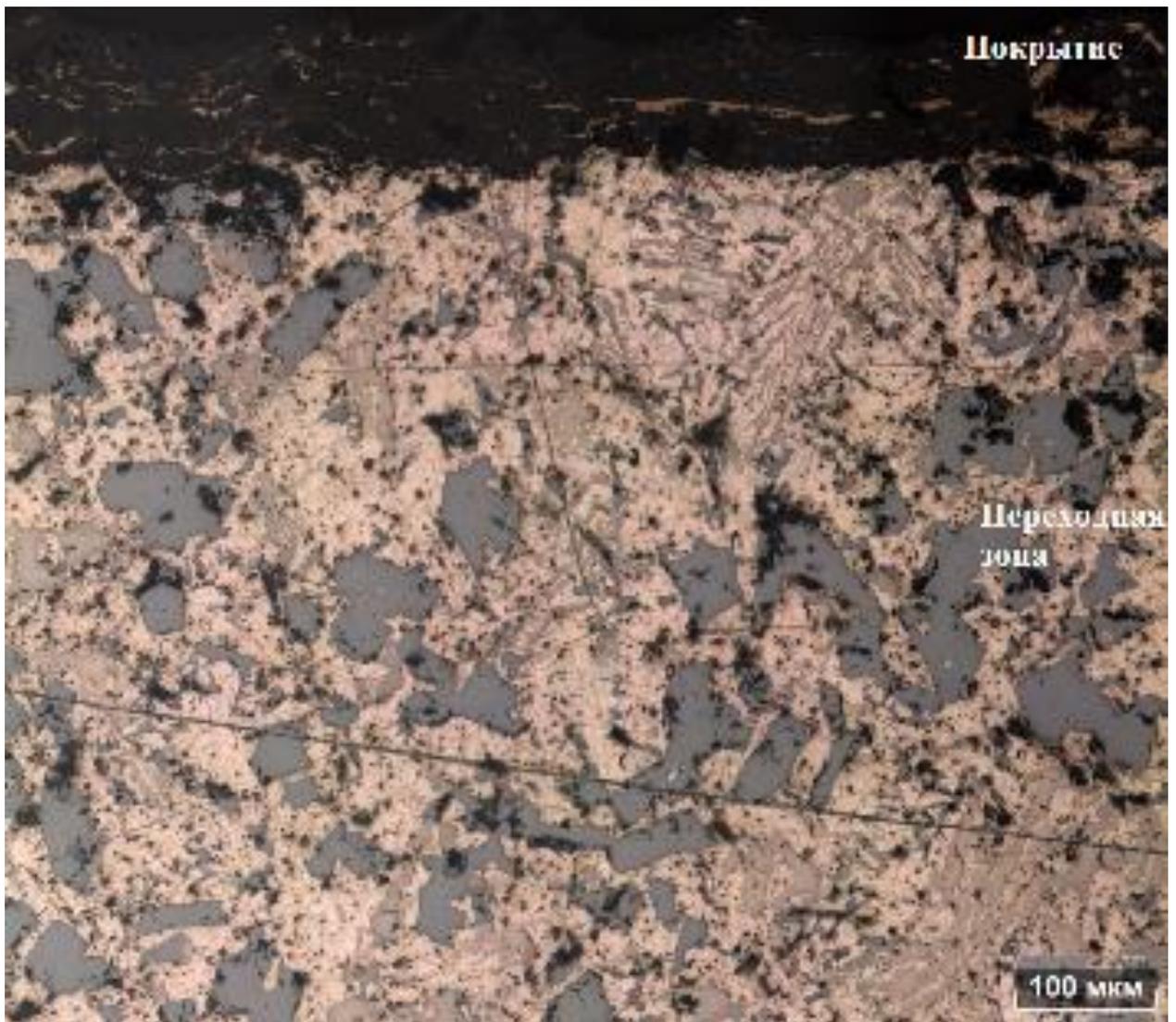


Рисунок 4.12 – Структура переходной зоны и покрытия образца, напыленного составом 70% Al + 30% C₆₀ + В₄С, светлое поле

Строение дополнительной фазы – преимущественно пластинчатое, однако встречаются и островковые формы в количестве порядка 15%. Дополнительная фаза представляет собой какое-либо из соединений кремния: ввиду большого содержания кремния в основном металле возможно образование α -фазы (Fe_2SiAl_8), β -фазы (FeSiAl_5), δ -фазы (FeSi_2Al_4) или γ -фазы (FeSiAl_3) [137, 142].

Само напыленное покрытие имеет характерную для газодетонационного покрытия слоистую структуру со светлыми границами между слоями, содержащими повышенное количество предположительно алюминия (рисунок 4.13): покрытие довольно однородное, структура слоистая, граница раздела «покрытие-материал» четкая, пористость незначительная (менее 3%).

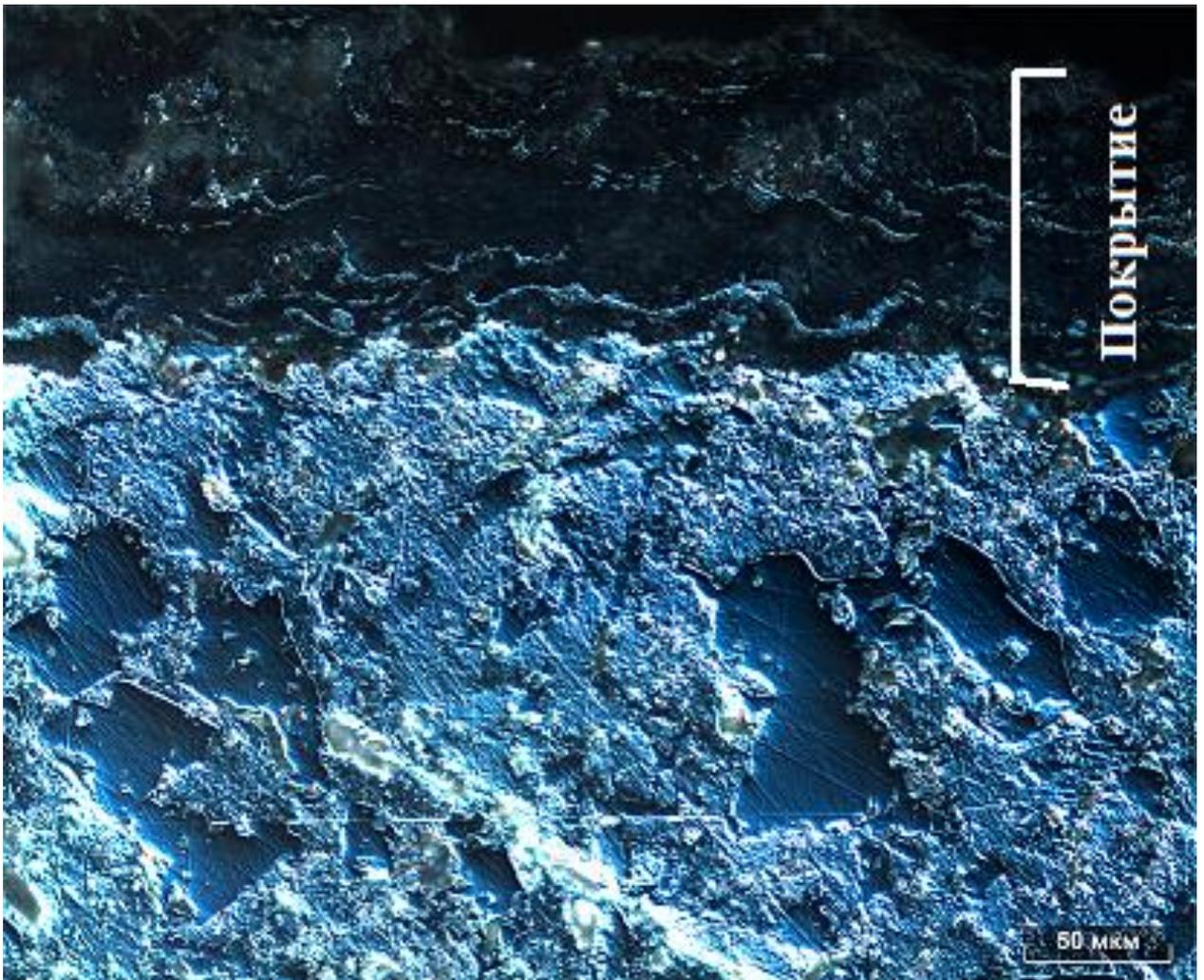


Рисунок 4.13 – Структура переходной зоны и покрытия образца, напыленного составом 70% Al + 30% C_{60} + V_4C , круговая поляризация (C-DIC)

Средний размер пор составляет порядка 9 мкм, максимальный размер пор – 11 мкм, минимальный размер пор – 3,7 мкм. Поры являются закрытыми, локализованы в покрытии. Присутствие незначительного количества пор в покрытии предположительно будет способствовать увеличению антифрикционных свойств поршня в связи с возможностью удержания в порах некоторого количества смазочного вещества [137, 142].

При нанесении газодетонационным способом покрытия второго состава, содержащего 70% Al + 30% C + B₄C, в результате интенсивных пластических деформаций происходит переформирование первичной фазы (кремния) – эта фаза приобретает игольчатый вид, крупные кристаллы ее исчезают вплоть до глубины 0,5 мм от поверхности (рисунок 4.14).

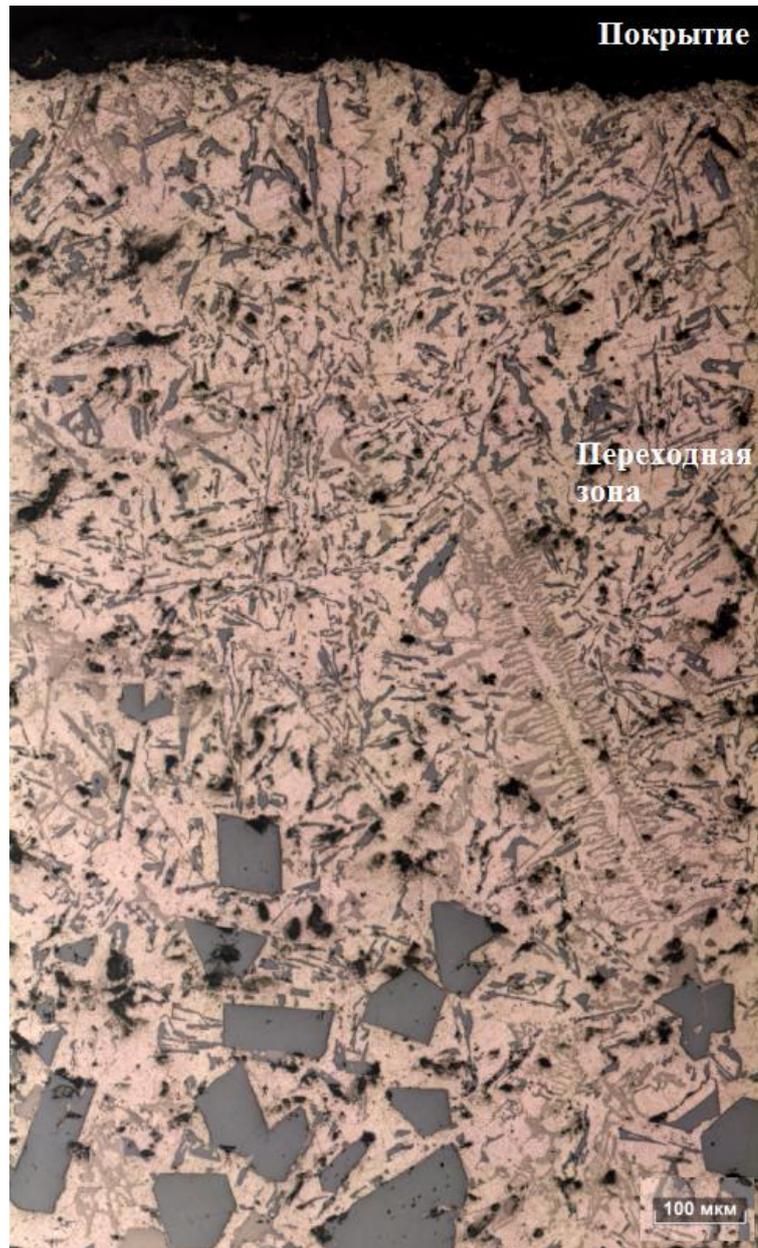


Рисунок 4.14 – Структура переходной зоны образца, напыленного составом $70\% \text{ Al} + 30\% \text{ C} + \text{V}_4\text{C}$, светлое поле

На глубине более 0,5 мм от поверхности первичная фаза сохраняется и приобретает вид правильных многоугольников (по сравнению с переходной зоной образца на рисунках 4.12-4.13). Строение дополнительной фазы – преимущественно пластинчатое, однако встречаются и ее формы в виде дендритов количестве порядка 4-5% [137, 142].

Структура напыленного покрытия (рисунок 4.15) в данном случае обладает менее выраженной слоистостью по сравнению с покрытием, полученным при нанесении состава № 1. Средний размер пор составляет порядка 5-7

мкм, максимальный размер пор – 12мкм, минимальный размер пор – 1,4 мкм. Граница раздела «покрытие-материал» четкая. Средняя толщина покрытия составляет 65 мкм.



Рисунок 4.15 – Структура покрытия образца, напыленного составом 70% Al + 30% C + B₄C, круговая поляризация (C-DIC)

4.3 Растровый электронный анализ газодетонационных покрытий

Были проведены исследования морфологии наплавленных покрытий с помощью растрового электронного микроскопа. Они подтвердили сделанные ранее выводы по оптической микроскопии.

На рисунке 4.15 представлено покрытие, напыленное составом № 1 (композиционной смесью, содержащей 70% Al + 30% C₆₀ + B₄C, 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 [143].

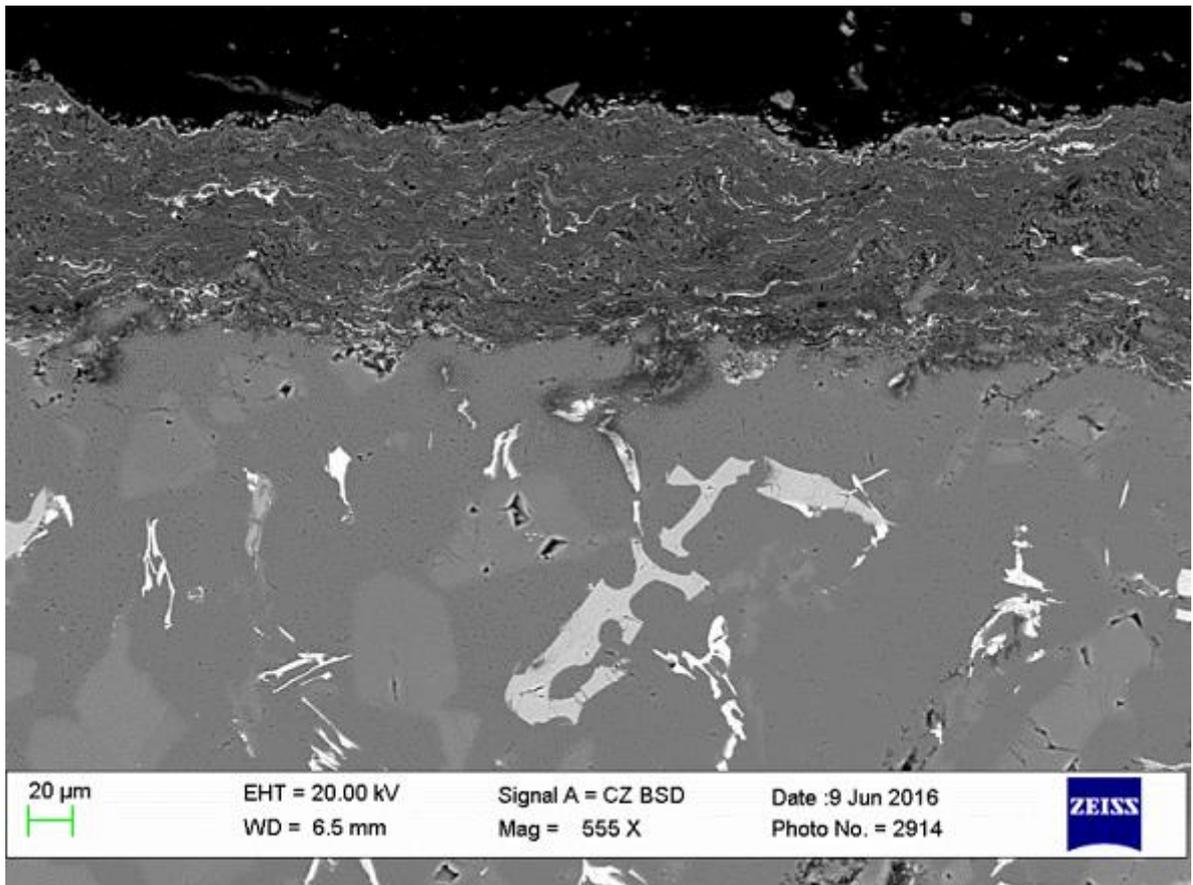


Рисунок 4.16 – Структура покрытия образца, напыленного составом 70% Al + 30% C₆₀ + B₄C

Основной материал представлен матрицей алюминия с содержанием скелетной эвтектики на основе кремния. Присутствуют вторичные выделения кремнистой фазы, имеющие игольчатый вид.

В структуре покрытия присутствуют ярко выраженные прослойки, представленные малопроводной фазой, накапливающей заряд, что хорошо просматривается во вторичных электронах (рисунок 4.17). Наиболее логичное предположение, что фаза, имеющая низкую проводимость – карбиды алюминия. Вероятная толщина прослоек карбида алюминия не превышает 0,3...0,5 мкм, однако эти прослойки должны иметь значительную протяженность в плоскости покрытия, иначе заряд с них бы стекал [143].

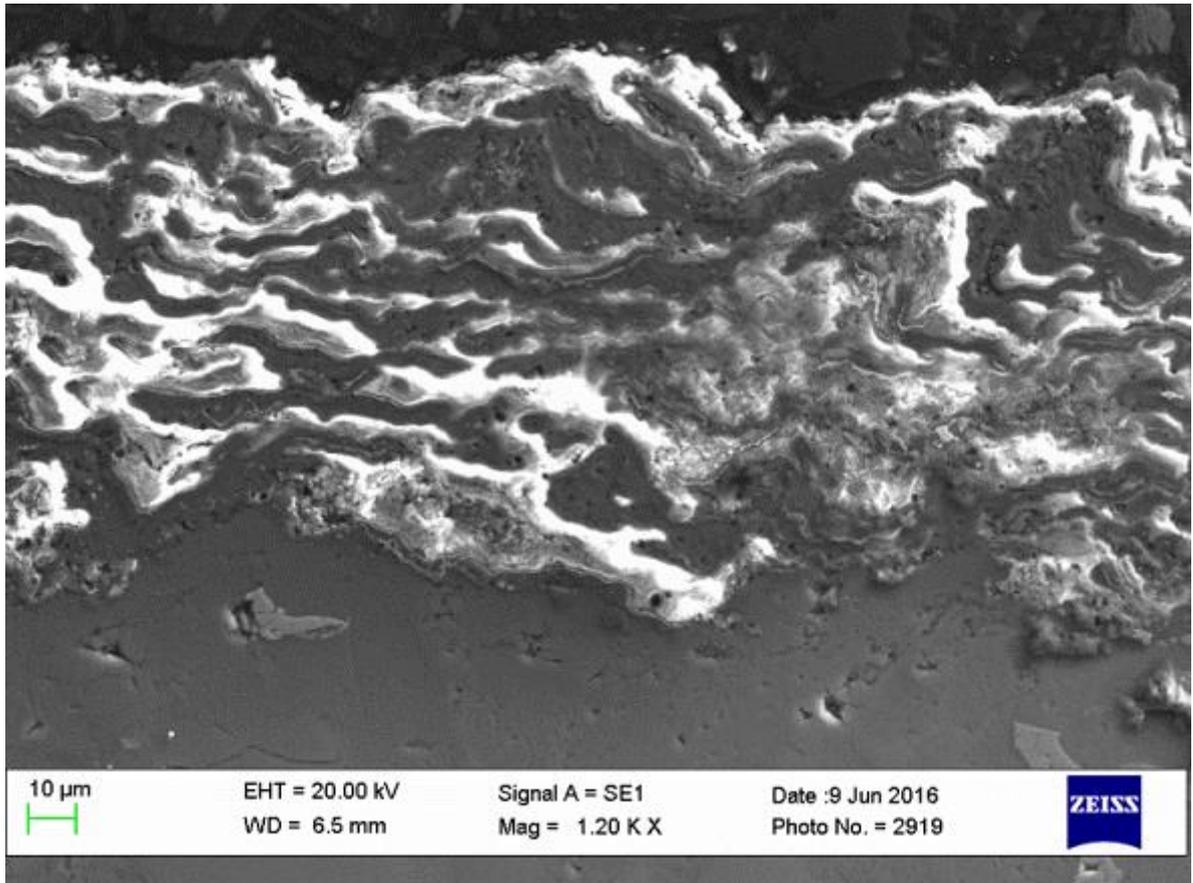


Рисунок 4.17 – Структура покрытия образца, напыленного составом 70% Al + 30% C₆₀ + V₄C, в контрасте вторичных электронов

Покрытие, напыленное составом 70% Al + 30% C + V₄C, однородное, слоистость выражена не ярко (рисунок 4.18). Однородность покрытия выше, чем в предыдущем случае, пористость незначительная, размер пор не превышает 3 мкм. Основной материал (рисунок 4.19) представлен эвтектикой со вторичными выделениями кремнистой фазы [143].

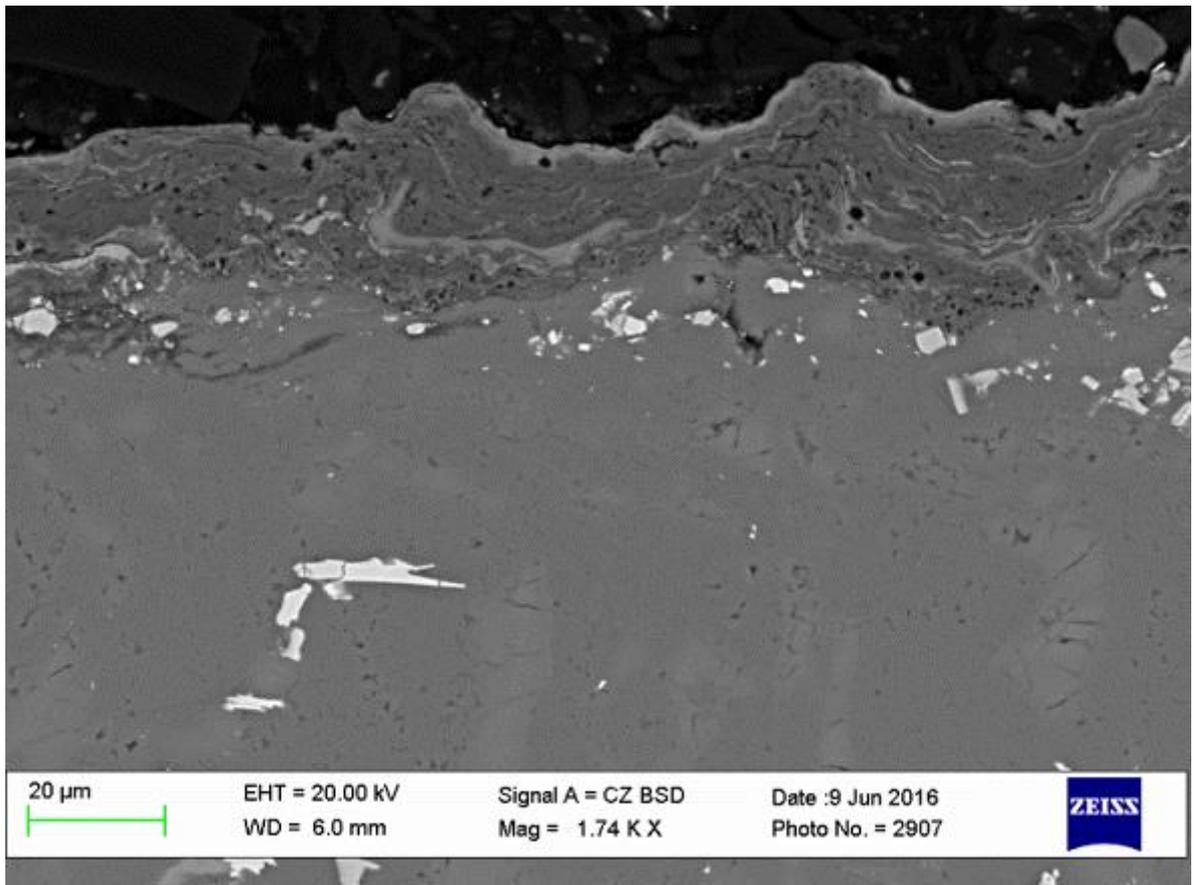


Рисунок 4.18 – Структура покрытия образца, напыленного составом 70% Al + 30% C + B₄C

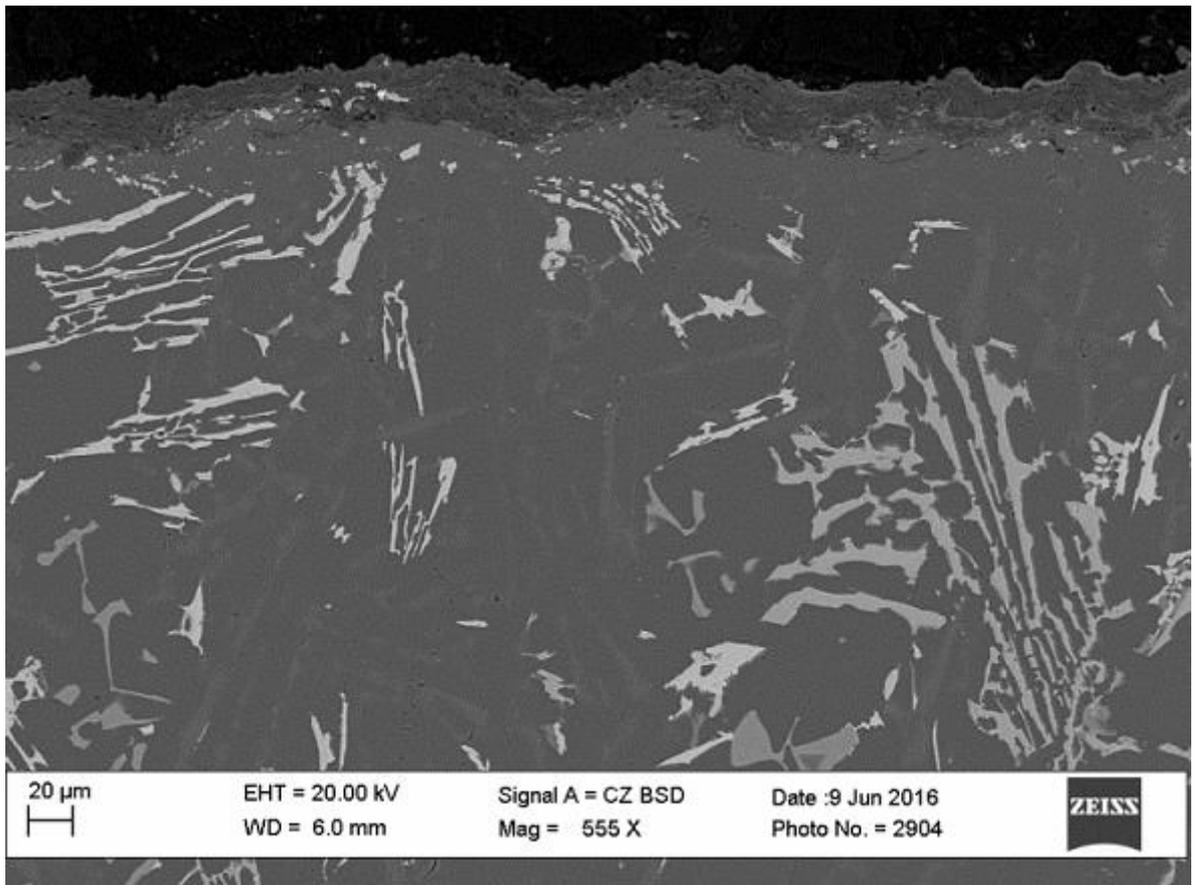


Рисунок 4.19 – Структура переходной зоны и покрытия образца, напыленного составом 70% Al + 30% C + V₄C

На рисунке 4.20, полученном в контрасте вторичных электронов, можно также, как и в предыдущем случае, отметить наличие малоэлектропроводной фазы предположительно карбида алюминия. Однако ее объем и протяженность меньше, чем в случае первого покрытия.

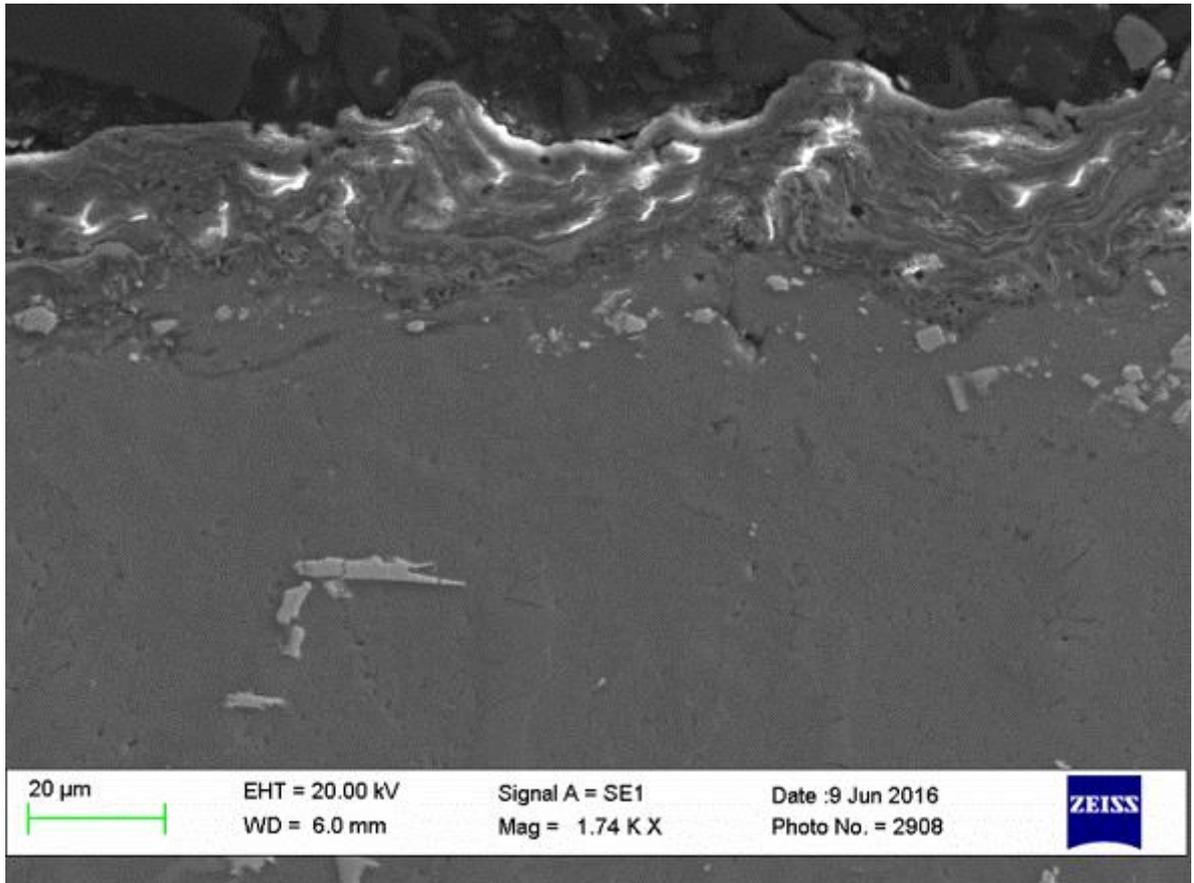
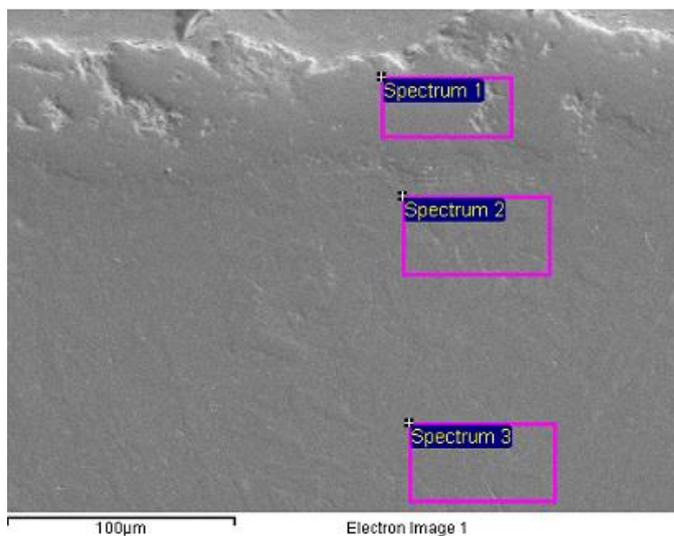


Рисунок 4.20 – Структура покрытия образца, напыленного составом 70% Al + 30% C + V₄C, в контрасте вторичных электронов

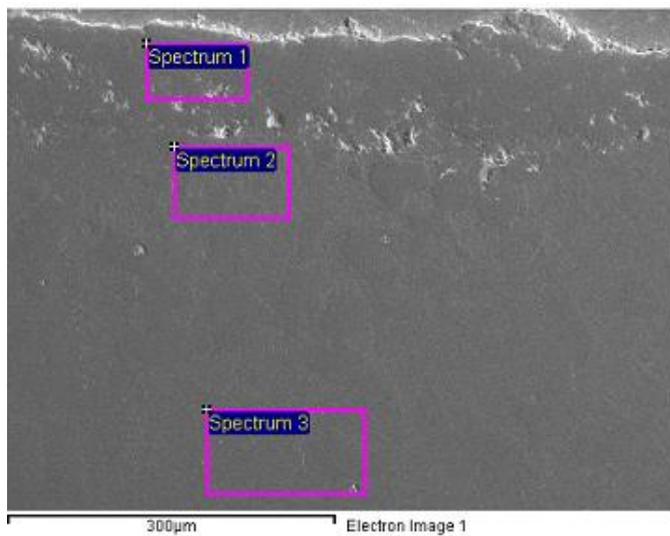
Результаты элементного анализа образца с покрытием, напыленного составом 70% Al + 30% C₆₀ + V₄C, приведены в таблице на рисунке 4.21.



	Элемент	Весовой %
Спектр 1 (покрытие)	B	1,69
	C	36,26
	Al	62,04
Спектр 2 (переходная зона)	C	22,92
	Al	57,21
	Si	19,87
Спектр 3 (подложка)	C	1,27
	Al	63,32
	Si	29,52
	Ni	3,22
	Cu	2,67

Рисунок 4.21 – Результаты энергодисперсионного анализа образца с покрытием, напыленным составом 70% Al + 30% C₆₀ + B₄C

Аналогичные исследования элементного содержания образца с покрытием, напыленного составом 70% Al + 30% C + B₄C, показали, что в отличие от предыдущего случая, происходит диффундирование бора из покрытия в переходную зону (рисунок 4.22) [143].



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

Рисунок 4.22 – Результаты энергодисперсионного анализа образца с покрытием, напыленного составом 70% Al + 30% C + B₄C

4.4 Рентгенофазовый анализ покрытий

Результаты рентгенофазового анализа покрытий, напыленных составом 70% Al + 30% C₆₀ + B₄C и составом 70% Al + 30% C + B₄C, приведены на рисунках 4.23 и 4.24 соответственно.

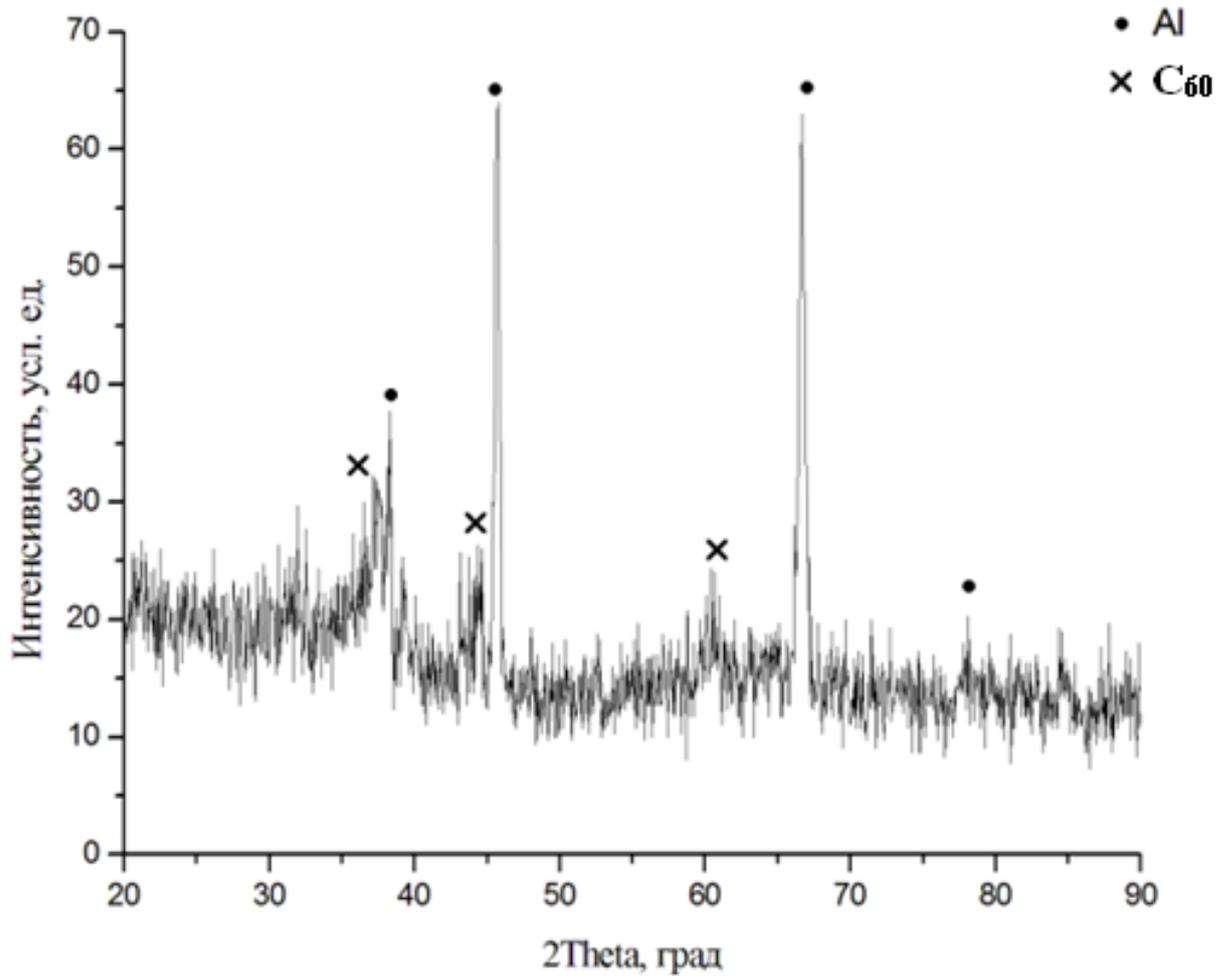


Рисунок 4.23 – Дифрактограмма газодетонационного покрытия образца, напыленного составом 70% Al + 30% C₆₀ + B₄C

В таблице 4.1 приведено сравнение параметров экспериментальных и эталонных дифракционных максимумов алюминия (снято на CuKα-излучении ($\lambda=1.5418 \text{ \AA}$), соответствует рисунку 4.23).

Таблица 4.1 - Сравнение параметров экспериментальных и эталонных дифракционных максимумов Al

Экспериментальные значения Al		Эталонные значение Al по (4-787) Natl. Bur. Stand (U.S.), Circ.539, Swanson, Tatge., I, 11, 1953 (База данных порошковой дифрактометрии PD Win 3.0).	
2Theta, град.	d, Å	2Theta, град.	d, Å
38.39	2.342	38.47	2.338
44.88	2.010	44.47	2.024
65.71	1.412	65.13	1.431
78.31	1.220	78.22	1.221

В таблице 4.2 приведено сравнение параметров экспериментальных и эталонных дифракционных максимумов фуллерена (снято на CuK α -излучении ($\lambda=1.5418 \text{ \AA}$), соответствует рисунку 4.23).

Таблица 4.2 - Сравнение параметров экспериментальных и эталонных дифракционных максимумов C

Экспериментальные значения C		Эталонные значение C по (44-558) Powder Diffraction, McCready, D., Alnajjar, M., 9, 93, 1994.	
2Theta, град.	d, Å	2Theta, град.	d, Å
37.46	2.39	37.48	2.39
44.31	2.04	44.28	2.04
60.01	1.54	59.75	1.55

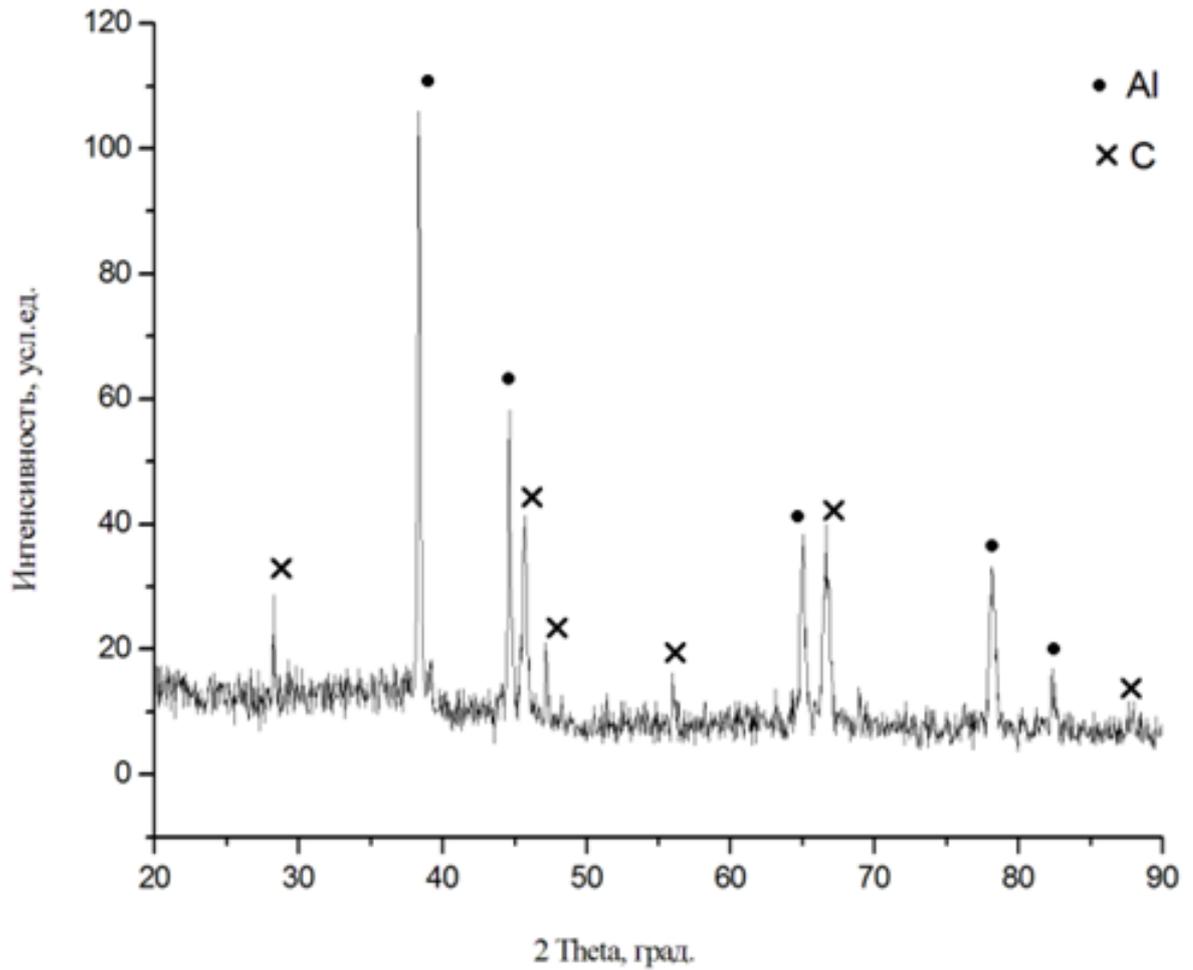


Рисунок 4.24 – Дифрактограмма газодетонационного покрытия образца, напыленного составом 70% Al + 30% C + B₄C

В таблице 4.3 приведено сравнение параметров экспериментальных и эталонных дифракционных максимумов алюминия (снято на CuK α -излучении ($\lambda=1.5418 \text{ \AA}$), соответствует рисунку 4.24).

Таблица 4.3 - Сравнение параметров экспериментальных и эталонных дифракционных максимумов Al

Экспериментальные значения Al		Эталонные значения Al по (4-787) Natl. Bur. Stand (U.S.), Circ.539, Swanson, Tatge., I, 11, 1953 (База данных порошковой дифрактометрии PD Win 3.0).	
2Theta, град.	d, Å	2Theta, град.	d, Å
38.40	2.345	38.47	2.338
44.66	2.027	44.73	2.024
65.09	1.432	65.13	1.431
78.20	1.221	78.22	1.221
82.42	1.169	82.43	1.169

В таблице 4.4 приведено сравнение параметров экспериментальных и эталонных дифракционных максимумов углерода (снято на CuK α -излучении ($\lambda=1.5418 \text{ \AA}$), соответствует рисунку 4.24).

Таблица 4.4 - Сравнение параметров экспериментальных и эталонных дифракционных максимумов С

Экспериментальные значения С		Эталонные значения С по (46-943, 46-944) Inorg. Mater. (Engl. Transl.), Shterenberg, L., Bogdanova, S., 15, 632, 1979; (2610-78)* U.S. AEC Oak Ridge Y-12 Plant, Report Y1887, Holcombe., 1973.	
2Theta, град.	d, А	2Theta, град.	d, А
28.60	3.12	28.59	3.12
45.51	1.99	45.54	1.99
47.71	1.92	47.83	1.90
56.06	1.63	56.03	1.64
66.25	1.40	66.23	1.41
68.7	1.36	68.3*	1.37*

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 покрытии не обнаружено. Углерод и фуллерен, находящиеся в покрытии в кристаллическом состоянии будут способствовать снижению коэффициентов трения поршня дизельного двигателя в процессе его работы, тем самым повысят общий ресурс работы двигателя [136, 137].

4.5 Анализ поверхности газодетонационных покрытий

Данные исследования проводились с помощью оптического профилометра-интерферометра VEECO (WYKO) NT 9080.

Результаты определения топологии поверхности полученного покрытия занесены в таблицу 4.5 и показаны на рисунках 4.25-4.27. Топология поверхности была определена путем компьютерного трехмерного моделирования на основе данных, полученных с помощью интерферометра-профилометра [144].

Таблица 4.5 – Результаты определения параметров шероховатости газодетонационных покрытий, напыленных алюмоматричными композиционными материалами

Шероховатость покрытия, напыленного составом 70% Al + 30% C ₆₀ + B ₄ C			Шероховатость покрытия, напыленного составом 70% Al + 30% C + B ₄ C		
№ измерения	Ra, мкм	Rq, мкм	№ измерения	Ra	Rq
1	6,94	8,9	1	7,7	9,74
2	6,2	8,53	2	5,27	6,57
3	12,71	15,52	3	5,27	6,56
4	8,05	10,46	4	4,16	5,27
5	7,55	9,34	5	5,87	7,21
6	8,87	11,16	6	6,17	7,68
7	8,43	10,51	7	5,26	6,53
8	13,94	17,15	8	4,6	5,72
9	9,22	11,05	9	5,38	6,75
10	11,23	13,54	10	5,05	6,37
максимальное	13,94	17,15	максимальное	7,7	9,74
минимальное	6,2	8,53	минимальное	4,16	5,27
Среднее	9,31	11,62	Среднее	5,47	6,84



3-Dimensional Interactive Display

Surface Stats:

Ra: 6.94 μm

Rq: 8.90 μm

Rt: 58.35 μm

Measurement Info:

Magnification: 20.20

Measurement Mode: VSI

Sampling: 490.03 nm

Array Size: 640 X 480

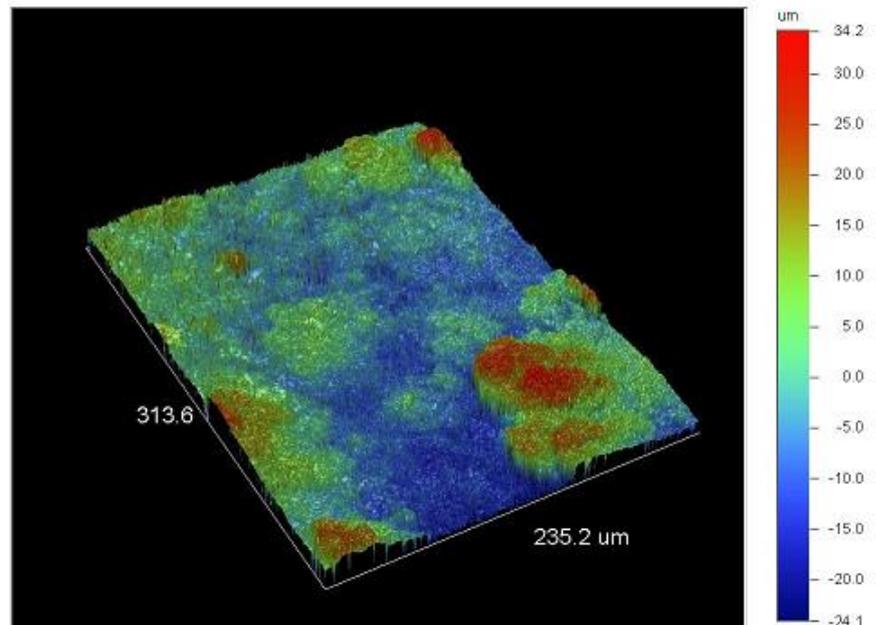


Рисунок 4.25 – Трехмерная модель шероховатости газодетонационного покрытия состава 70 % Al + 30 % C₆₀ + B₄C



3-Dimensional Interactive Display

Surface Stats:

Ra: 5.27 μm

Rq: 6.56 μm

Rt: 53.20 μm

Measurement Info:

Magnification: 20.20

Measurement Mode: VSI

Sampling: 490.03 nm

Array Size: 640 X 480

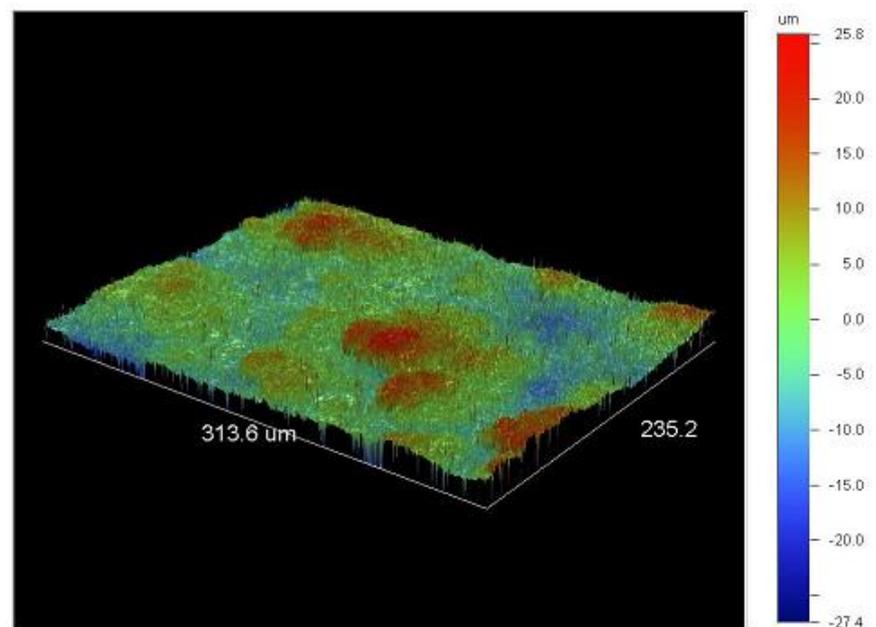


Рисунок 4.26 – Трехмерная модель шероховатости газодетонационного покрытия состава 70 % Al + 30 % C + B₄C

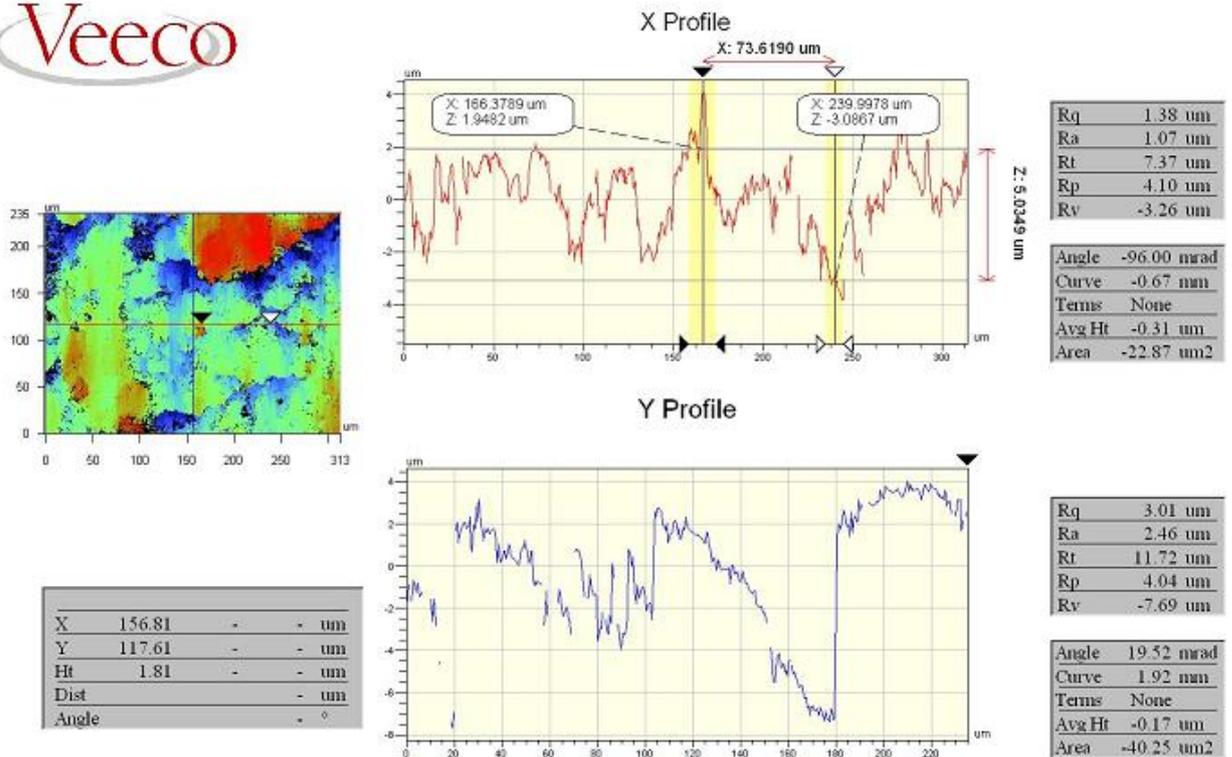


Рисунок 4.27 – Обработка снимка поверхности газодетонационного покрытия, напыленного составом 70 % Al + 30 % C₆₀ + V₄C

По результатам определения топологии поверхности можно сделать вывод о наличии выступов и впадин по площади поверхности покрытия. Величина шероховатости определяется прибором с высокой точностью и составляет от Ra 4,16 до Ra 13,94 [144]. 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.

4.6 Выводы по главе

1. Результаты моделирования по конечно-элементной методике «вычисляемая жидкостная динамика» (Computational Fluid Dynamics – CFD) в программном комплексе Ansys Workbench показывают, 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 покрытия не значительна. Наиболее рациональной для напыления является размерная группа 63...100 мкм. В результате моделирования также установлено, 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.

2. С помощью стенда визуального исследования параметров потока частиц, который позволяет в масштабе реального времени определять скорости частиц потока, проведено измерение скорости частиц в импульсном потоке детонационного напыления по методике Particle Tracking Velocimetry (PTV – измерение скорости по трекам частицы). Выявлена средняя скорость частиц алюмоматричного материала (400 м/с) при заданных параметрах напыления, 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 программном комплексе Ansys Workbench и экспериментального определения скоростей движения частиц алюмоматричного композиционного материала коррелируют друг с другом.

3. По результатам оптического исследования покрытия, напыленного составом 70% Al + 30% C₆₀ + B₄C, установлено, что само покрытие имеет характерную для газодетонационного покрытия слоистую структуру со светлыми границами между слоями, содержащими повышенное количество предположительно алюминия: покрытие довольно однородное, структура слоистая, граница раздела «покрытие-материал» четкая, пористость незначи-

тельная (менее 3%). Средний размер пор составляет порядка 9 мкм, максимальный размер пор – 11 мкм, минимальный размер пор – 3,7 мкм.

4. Аналогичные оптические 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 5-7 мкм, максимальный размер пор – 12 мкм, минимальный размер пор – 1,4 мкм. Граница раздела «покрытие-материал» четкая. Средняя толщина покрытия составляет 65 мкм.

5. Растровый электронный анализ образца, напыленного составом 70% Al + 30% C₆₀ + B₄C, показал, что 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 + B₄C, однородное, слоистость выражена не ярко (рисунок 4.18). Однородность покрытия выше, чем в предыдущем случае, пористость незначительная, размер пор не превышает 3 мкм.

6. 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.

7. Изучение рентгенограмм покрытий показало, что 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 покрытии не обнаружено. Углерод и фуллерен, находящиеся в покрытии, будут способство-

вать снижению коэффициентов трения поршня дизельного двигателя в процессе его работы, тем самым повысят общий ресурс работы двигателя.

8. 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 Ra 4,16 до Ra 13,94. 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.

ГЛАВА 5. ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ И АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1 Исследование антифрикционных и износостойких свойств газодетонационных покрытий

Трибологические исследования полученных покрытий проводились с помощью триботехнического комплекса, разработанного на базе машины для испытания материалов на трение 2168 УМТ (рисунок 5.1). Управление комплексом осуществляется компьютеризировано. Сама машина позволяет проводить исследование материалов различного рода на трение в широком диапазоне схем испытания, действующих нагрузок на образец и скоростей трения.

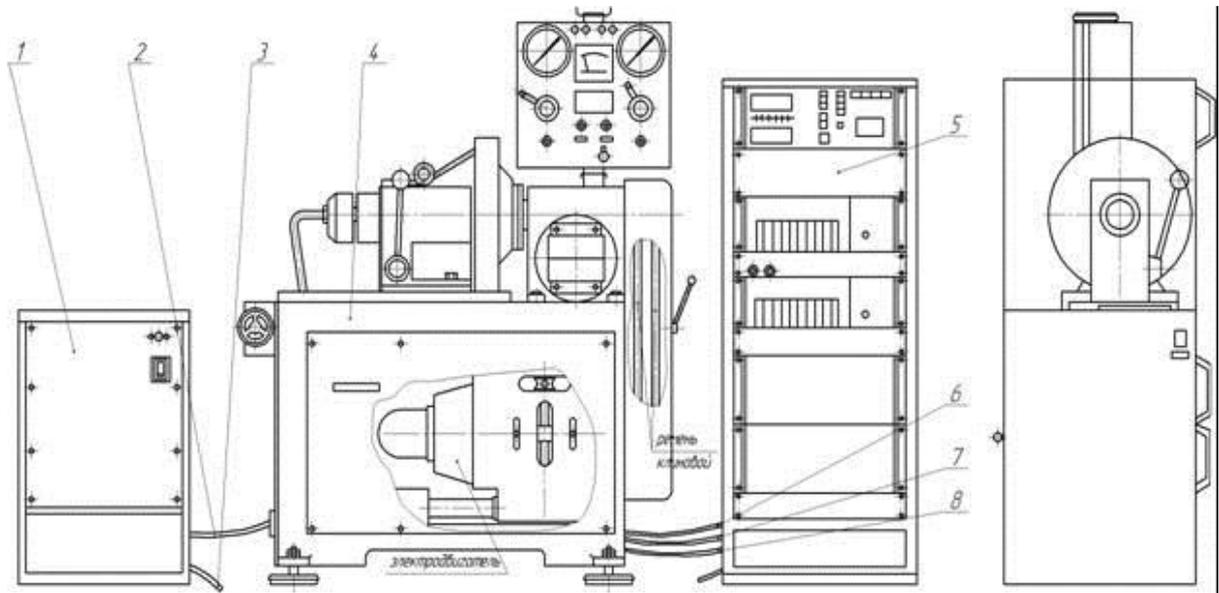


Рисунок 5.1 – Общий вид машины 2168 УМТ: 1 – системы питания электроэнергией; 2 – соединительные кабели; 3 – заземление установки; 4 – непосредственно машина трения; 5 – пульт управления машиной трения; 6-8 – соединительные устройства.

Исследования антифрикционных и износостойких свойств проводились по схеме «диск-колодка» в сухом режиме при вращательном движении диска (рисунок 5.2). 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. Перед каждым испытанием проводилась промывка пары трения и ее просушка с целью удаления продуктов износа.

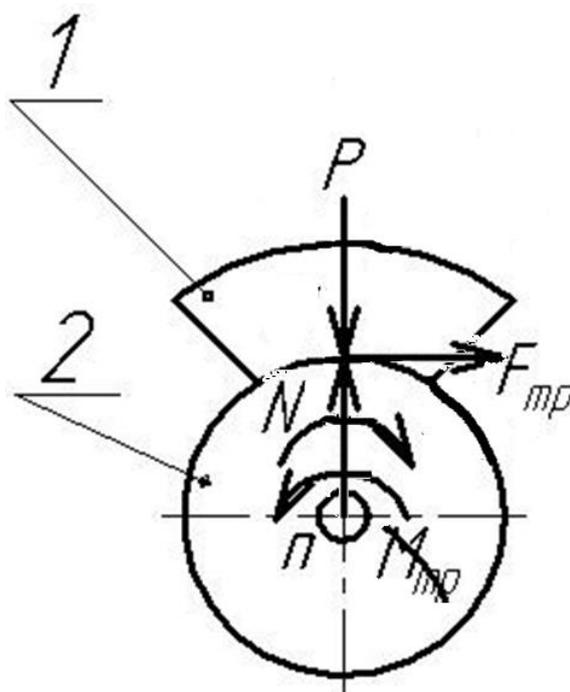


Рисунок 5.2 – Схема проведения эксперимента колодки с покрытием:

1 – колодка из поршневого сплава, 2 – диск из стали 40

Цикл трибологических испытаний состоял в предварительной приработке покрытия при скорости 0,9 м/с и нагрузке 1,47 МПа [145, 146]. 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 трибологических испытаний. Перед определением массы образцы промывали для удаления продуктов износа. Затем с помощью макросъемки оценивали область локального контакта в трибопаре.

Нагрузить диски с покрытиями до задира 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 [145, 146]

Графическая зависимость коэффициента трения покрытий от нагрузки показана на рисунке 5.3. 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.

Коэффициент трения покрытия состава № 2 (композиционная порошковая смесь 70% Al + 30% C₆₀ + 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 [145, 146].

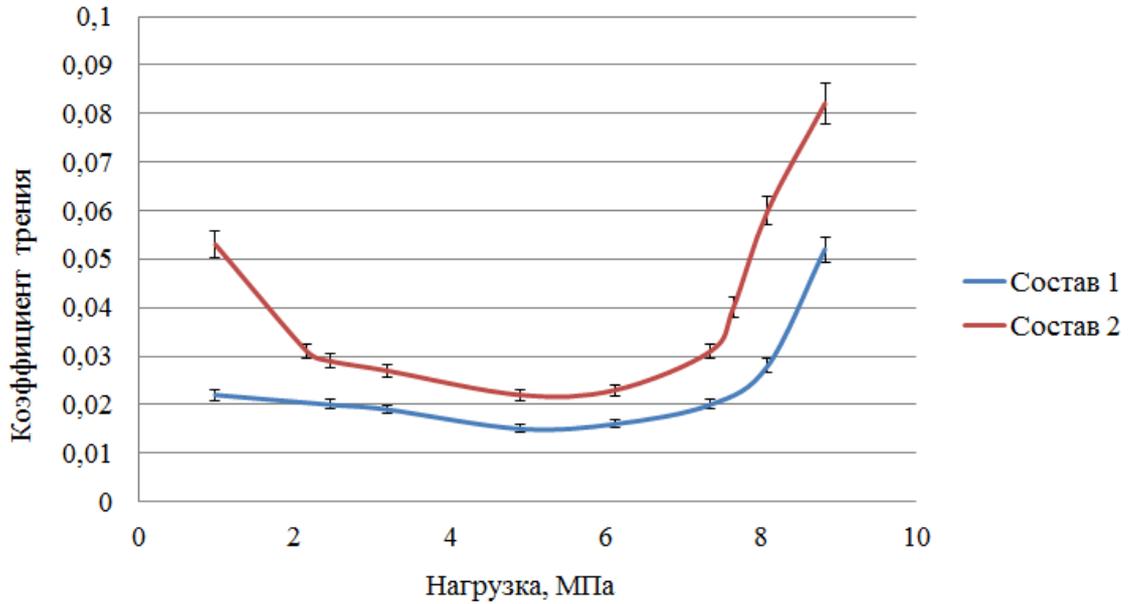


Рисунок 5.3 – Зависимость коэффициента трения покрытий от нагрузки:
Состав 1 – 70% Al + 30% C + V₄C; Состав 2 – 70% Al + 30% C₆₀ + V₄C

Для сравнения на рисунке 5.4 приведены данные по испытаниям материала поршня без напыленных покрытий (верхняя зеленая линия).

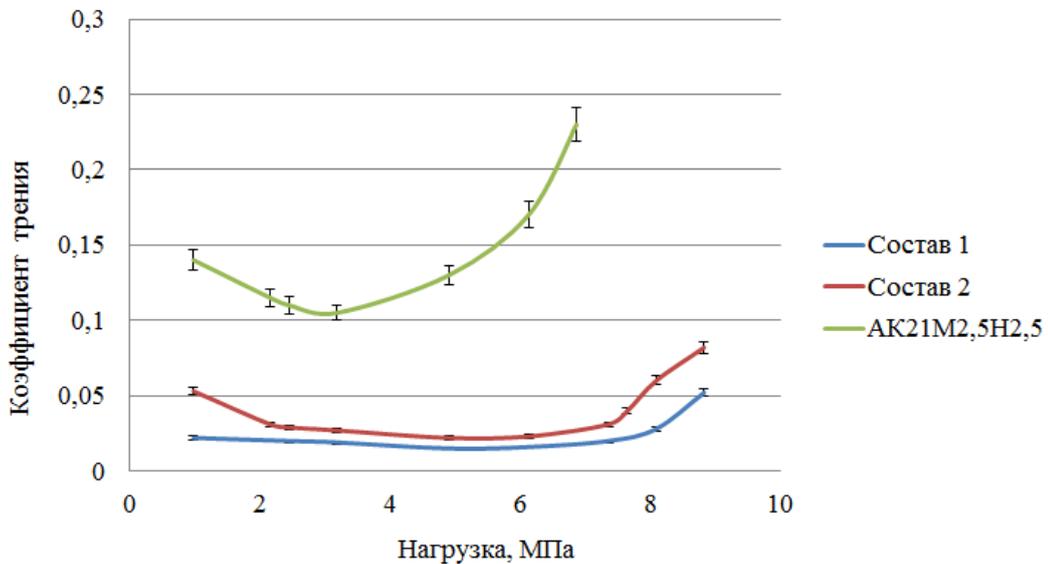


Рисунок 5.4 – Зависимость коэффициента трения покрытий от нагрузки:
Состав 1 – 70% Al + 30% C + V₄C; Состав 2 – 70% Al + 30% C₆₀ + V₄C

Условия трибологических испытаний приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – 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 (композиционная порошковая смесь 70% Al + 30% C + В ₄ С после 7 минут механоактивации)	0,9	7,35	6	0,59	0,018	>9,81	95
Состав 2 (композиционная порошковая смесь 70% Al + 30% С ₆₀ + В ₄ С после 7 минут механоактивации)		7,35		2,65	0,035	>9,81	93
AK21M2,5H2,5		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 AK21M2,5H2,5 [146].

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 двигателей внутреннего сгорания [147].

5.2 Газодетонационное напыление рабочих поверхностей поршня ДВС транспортного средства «Поларис»

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». Прогулочный мотовездеход «Поларис» с поперечной посадкой предназначен для экстремальных поездок по любому типу покрытия. 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).

Поршень до напыления представлен на рисунке 5.5 справа. Слева на этом же рисунке приведен напыленный поршень.



Рисунок 5.5 – Поршень двигателя «Поларис» (справа – подготовленный для восстановления, слева – с напыленным газодетонационным покрытием)

Напыление осуществлялось с дистанции 100 мм, при стехиометрическом соотношении газов. Было выполнено по 300 циклов напыления на каждую грань юбки поршня. В результате эксперимента сформировалось покрытие толщиной порядка 70 мкм (рисунок 5.6).



Рисунок 5.6 – Юбка поршня двигателя «Поларис» с напыленным покрытием

На один поршень было проведено напыление состава № 1 (композиционная порошковая смесь 70% Al + 30% C + V_4C после 7 минут механоактивации), на другой – состава № 2 (композиционная порошковая смесь 70% Al + 30% C_{60} + V_4C после 7 минут механоактивации).

После этого был проведен экспресс-тест адгезионных свойств полученных 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.

5.3 Рекомендации по газодетонационному напылению антифрикционных покрытий поршня ДВС

Физико-химические основы процесса детонационного напыления, рекомендации по созданию оборудования и разработке технологических режимов напыления, а также исследования свойств получаемых покрытий изложены в работах [102, 118, 119, 121, 122, 148-152].

Поскольку процесс детонационного нанесения покрытий является многофакторным, то необходимо не только обобщать экспериментальные данные, но и совершенствовать теоретические модели, которые позволяют количественно описать процессы, сопровождающие детонационное напыление, исследовать испарение и нагрев частиц порошка, поскольку это необходимо для оптимизации технологического процесса нанесения покрытий с целью обеспечения требуемых физико-механических свойств покрытий. Обычно в литературных источниках приводятся весьма ограниченные данные о технологических режимах детонационно-газового напыления.

Отсутствие в публикациях данных о длине ствола установки напыления, его поперечном сечении, скорострельности, месте ввода порошка в ствол установки и исходном положении его в стволе во время детонационного сгорания горючей смеси, о величине дозы порошка, способе исходной подготовки порошка, дистанции напыления практически делает очень сложным возможность воспроизведения условий и результатов напыления.

Физико-химический анализ условий формирования покрытий показывает их существенную зависимость от скорости и температуры частиц порошка в момент соударения с подложкой. В связи с этим возникает потребность в оценке и установлении основных параметров скорости и температуры частиц в стволе установки, соблюдение которых обеспечит стабильность свойств наносимых покрытий.

Схема рабочего цикла установки детонационного напыления приведена на рисунке 5.7.



Рисунок 5.7 - Схема рабочего цикла детонационного нанесения

На основании проведенной работы и анализа публикаций в области газодетонационных покрытий можно выделить ряд основных параметров, определяющих свойства детонационных покрытий:

- 1) агрегатное состояние частиц перед их взаимодействием с подложкой;
- 2) концентрация расплавленных частиц;
- 3) скорость частиц;

- 4) химический состав и физические свойства материала частиц и поверхности подложки;
- 5) средний размер частиц;
- 6) распределение частицы по размерам;
- 7) геометрия поверхности подложки;
- 8) температура подогрева подложки;
- 9) диаметр ствола;
- 10) длина ствола;
- 11) интервал между выстрелами;
- 12) доза газовой смеси на один выстрел;
- 13) состав газовой смеси в стволе между выстрелами.

Основные принципы построения и оптимизации технологического процесса детонационного напыления покрытий из порошков различных материалов заключаются в следующем. Механокомпозит на основе алюминия характеризуется тем, что его частицы нагреваются до температуры кипения и при выборе режимов для таких порошков необходимо не допускать интенсивного испарения напыляемого материала. В первую очередь температуру частиц понижают введением максимально возможного количества порошка.

На первом этапе выбирается размер частиц из имеющегося в наличии порошка. Преимущество при выборе размера частиц порошка следует отдавать фракциям 63...100 мкм, так как из таких частиц формируются более плотные покрытия с минимальной шероховатостью поверхности. Минимальный размер ограничивается способностью стабильной транспортировки фракций порошка в ствол установки и определяется конструктивными особенностями дозатора. Затем определяется ориентировочный состав смеси. Объемное соотношение горючих газов для таких порошков выбирается в пределах от 1,051 до 1,4. Для легкоплавких порошков соотношение обычно выбирается максимально возможным, исходя из конструктивных особенностей дозатора.

Разработанные рекомендации по повышению антифрикционных и износостойких свойств поршня ДВС с помощью газодетонационных покрытий на основе алюмоматричного материала внедрены в хозяйственную деятельность АО «Барнаултрансмаш» – специализированного предприятия по конструированию и производству судовых, промышленных, транспортных дизелей.

5.4 Выводы по главе

1. Трибологические исследования полученных покрытий проводились с помощью триботехнического комплекса, разработанного на базе машины для испытания материалов на трение 2168 УМТ. Исследования антифрикционных и износостойких свойств проводились по схеме «диск-колодка» в сухом режиме при вращательном движении диска. Условия проведения эксперимента по определению антифрикционных свойств покрытий: скорость вращения диска 0,9 м/с; нагрузка на трибопару составляла 6,37...7,35 МПа; испытания продолжались в течение 6 часов. Степень износостойкости определяли по потере массы образцов (с точностью до 0,01 г) в ходе трибологических испытаний. Перед определением массы образцы промывали для удаления продуктов износа. Затем с помощью макросъемки оценивали область локального контакта в трибопаре.

2. Нагрузить диски с покрытиями до задира 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.

Видно, что при нагрузке свыше 7,85 МПа появились локальные очаги схватывания покрытия состава № 2 (композиционная порошковая смесь 70% Al + 30% C₆₀ + В₄С после 7 минут механоактивации), однако до 9,81 МПа явления задира не наблюдалось.

3. Коэффициент трения покрытия, напыленного составом 70% Al + 30% C₆₀ + В₄С, при нагрузках 2,94...6,86 МПа не превышает 0,03, а мини-

мальное значение коэффициента (0,02) достигается при 5,88 МПа. Для покрытия, напыленного составом 70% Al + 30% C + B₄C, 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.

4. Относительная износостойкость покрытия, напыленного порошковой смесью 70% Al + 30% C + B₄C составила 95 %, а для покрытия, полученного составом 70% Al + 30% C₆₀ + B₄C – 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

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 C_{60} 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. %) + B_4C и 70% Al + 30% C_{60} (об. %) + B_4C 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» (Computational Fluid Dynamics – CFD) в программном комплексе Ansys Workbench 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 Particle Tracking Velocimetry (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 механокомпозитов. Результаты моделирования в программном комплексе Ansys Workbench 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 до задира 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% С + 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% С + 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% С + В₄С.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Белов, Н. А.** Алюминиевые сплавы антифрикционного назначения : монография [Текст] / Н. А. Белов и др.; под ред. А. Е. Миронова, Н. А. Белова, О. О. Столяровой. – М. : Изд. дом МИСиС, 2016. – 222 с.
2. **Игнатъев, И. Э.** Разработка технологии и исследование порошковых покрытий систем Al и Al-Pb : Диссертация ... кандидата технических наук : 05.16.06. [Текст] / Игорь Эдуардович Игнатъев. – Екатеринбург, 2003. – 137 с.
3. **Скоренцев, А. Л.** Разработка и исследование структуры, механических и трибологических свойств спеченных и подвергнутых равноканальному угловому прессованию композитов Al-Sn : Диссертация ... кандидата технических наук : 05.16.09. [Текст] / Александр Леонидович Скоренцев. – Томск, 2016. – 156 с.
4. **Евдокимов, И. А.** Исследование структурно-фазового состава и физико-механических свойств алюмоматричных композиционных материалов, упрочненных углеродными наноструктурами : Диссертация ... кандидата технических наук : 05.16.06. [Текст] / Иван Андреевич Евдокимов. – Владимир, 2013. – 169 с.
5. **Калашников, И. Е.** Развитие методов армирования и модифицирования структуры алюмоматричных композиционных материалов : Диссертация ... доктора технических наук : 05.16.06. [Текст] / Игорь Евгеньевич Калашников. – Москва, 2011. – 428 с.
6. **Hogmark, S.** Design and evaluation of tribological coatings [Text] / S. Hogmark, S. Jacobson, M. Larsson // Wear. – 2000. – V. 246. – P. 20–33.
7. **Bragg, W. H.** An Introduction to Crystal Analysis [Text] / W. H. Bragg. – London : G. Bell. – 1928. – P. 168.
8. **Аксенов, И. И.** Синтез безводородных пленок алмазоподобного углерода. Обзор. [Текст] / И. И. Аксенов, В. Е. Стрельницкий // 12 Между-

- народный. Симпозиум «Тонкие пленки в электронике». – Харьков. – 2001. – С. 96 – 105.
9. **Robertson, J.** Properties of diamond-like carbon [Text] / J. Robertson // Surface and Coatings Technology – 1992. – Vol. 50. – P. 185 – 203.
 10. **Grill, A.** Tribology of diamond-like carbon and related materials: an updated review [Text] / A. Grill // Surface and Coatings Technology. – 1997. – Vol. 94 – 95. – P. 507 – 513.
 11. **Donnet, C.** Recent progress on the tribology of doped diamond-like and carbon alloy coatings: a review [Text] / C. Donnet // Surface and Coatings Technology. – 1998. – Vol. 100 – 101. – P. 180 – 186.
 12. **Wei, Q.** Superhard diamond-like carbon: preparation, theory, and properties [Text] / Q. Wei, J. Narayan // International Materials Reviews. – 2000. – Vol. 45. – P. 133 – 164.
 13. **Voevodin, A. A.** Pulsed laser deposition of diamondlike carbon wear protective coatings: a review [Text] / A. A. Voevodin, M. S. Donley, J. S. Zabinski // Surface and Coatings Technology. – 1997. – Vol. 92. – P. 42 – 49.
 14. **Стрельницкий, В. Е.** Исследование триботехнических характеристик углеродных покрытий на воздухе и в вакууме [Текст] / В. Е. Стрельницкий, В. И. Кулеба, Г. Д. Гамуля, Е. Л. Островская, И. Л. Остапенко, В. Г. Падалка, А. И. Тимошенко // Сверхтвердые материалы. – 1987. – № 6. – С. 7 – 10.
 15. **Aksenov, I. I.** Tribological behavior of diamond-like carbon coating at high rate of sliding [Text] / I. I. Aksenov, M. G. Maksimov, Yu. Ya. Palij, V. E. Strel'nitskij // Diamond and Related Materials. – 1999. – Vol. 2. – P. 866 – 870.
 16. **Aksenov, I. I.** Vacuum-arc discharge as an instrument for PVD process of DLC films deposition [Text] / I. I. Aksenov, V. E. Strel'nitskij // Proceedings of ISDF – 5. – Kharkov. – 2002. – P. 39 – 64.

17. **Aksenov, I. I.** Properties of diamond-like coatings prepared by vacuum arc deposition [Text] / I. I. Aksenov, V. E. Strel'nitskij // Surface and Coatings Technology. – 1991. – V. 47. – P. 98 – 105.
18. **Boxman, R. L.** Recent progress in filtered vacuum arc deposition [Text] / R. L. Boxman, V. Zhitomirsky, B. Alterkop, E. Gidalevich, I. I. Beilis, M. Keidar, S. Goldsmith // Surface and Coatings Technology. – 1996. – V. 86 – 87. – P. 243 – 253.
19. **Martin, P. J.** Review of the filtered vacuum arc process and materials deposition [Text] / P. J. Martin, A. Bendavid // Thin Solid Films. – 2001. – Vol. 396. – P. 1 – 15.
20. **Hakovirta, M.** Techniques for filtering graphite macroparticles in the cathodic vacuum arc deposition of tetrahedral amorphous carbon films [Text] / M. Hakovirta, V. M. Tiainen, P. Pekko // Diamond and Related Materials. – 1999. – Vol. 8. – P. 1183-1192.
21. **Takikawa, H.** DLC thin film preparation by cathodic arc deposition with a super droplet-free system [Text] / H. Takikawa, K. Izumi, R. Miyano, T. Sakakibara // Surface and Coatings Technology. – 2003. – Vol. 163 – 164. – P. 368 – 373.
22. **Aksenov, I. I.** Wear resistance of diamond-like carbon coatings / I. I. Aksenov, V. E. Strel'nitskij [Text] // Surface and Coatings Technology. – 1991. – Vol. 47. – P. 252 – 256.
23. **Voevodin, A. A.** Friction induced phase transformation of pulsed laser deposited diamond-like carbon [Text] / A. A. Voevodin, A. W. Phelps, M. S. Donley, J. S. Zabinski // Diamond and Related Materials. – 1996. – Vol. 5. – P. 1264 – 1269.
24. **Krumpiegl, T.** Amorphous carbon coatings and their tribological behaviour at high temperatures and in high vacuum [Text] / T. Krumpiegl, H. Meerkamm, W. Fruth, C. Schaufler, G. Erkens, H. Bohner // Surface and Coatings Technology. – 1999. – Vol. 120-121. – P. 550 – 560.

25. **Liu, H.** The tribological characteristics of diamond-like carbon films at elevated temperatures [Text] / H. Liu, A. Tanaka, K. Umeda // Thin Solid Films. – 1999. – Vol. 346. – P.162 – 168.
26. **Hultman, L.** Fullerenelike carbon nitride: a resilient coating material [Text] / L. Hultman, J. Neidhardt, N. Hellgren, H. Sjostrom, J. E. Sundgren // MRS Bulletin. – 2003. – Vol. 28. – P. 194-202.
27. **Sjostrom, H.** Superhard and elastic carbon nitride thin films having fullerene-like microstructure [Text] / H. Sjostrom, S. Stafstrom, M. Boman, J.-E. Sundgren // Physical Review Letters.– 1995. – Vol. 75. – P. 1336 – 1339.
28. **Neidhardt, J.** Growth of fullerene-like carbon nitride thin solid films by reactive magnetron sputtering; role of low-energy ion irradiation in determining microstructure and mechanical properties [Text] / J. Neidhardt, Z. Czigany, I. F. Brunell, L. Hultman // Journal of Applied Physics. – 2003. – Vol. 93. – P. 3002 – 3014.
29. **Broitman, E.** Mechanical and tribological properties of CN_x films deposited by reactive magnetron sputtering [Text] / E. Broitman, N. Hellgren, O. Wanstrand, M. P. Johansson, T. Berlind, H. Sjostrom, J.-E. Sundgren, M. Larsson, L. Hultman // Wear. – 2001. – Vol. 248. – P. 55 – 64.
30. **Стрельницкий, В. Е.** Исследование плёнок алмазоподобного углерода и соединений углерода с азотом, синтезированных вакуумно-дуговым методом [Текст] / В. Е. Стрельницкий, И. И. Аксенов, В. В. Васильев, А. А. Воеводин, Дж. Г. Джонс, Дж. С. Забински // ФИП. – 2005. – т. 3. – № 1 – 2.
31. **Voevodin, A. A.** Growth and structure of fullerene-like CN_x thin films produced by pulsed laser ablation of graphite in nitrogen [Text] / A. A. Voevodin, J. G. Jones, J. S. Zabinski, Zs. Czigany, L. Hultman // Journal of Applied Physics. – 2002. – Vol. 92. – P. 4980 – 4988

32. **Ferrari, A. C.** Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon [Text] / A. C. Ferrari, J. Robertson // *Physical Review B*. – 2000. – Vol. 61. – P. 1409 – 1410.
33. **Chhowalla, M.** Evolution of sp^2 bonding with deposition temperature in tetrahedral amorphous carbon studied by Raman spectroscopy [Text] / M. Chhowalla, A. C. Ferrari, J. Robertson, G. A. J. Amaratunga // *Applied Physics Letters*. – 2000. – Vol. 76. – P. 1419 – 1421.
34. **Sobota, J.** C-N/MeN nanocomposite coatings, deposition and testing of performance [Text] / J. Sobota, G. Sorensen, H. Jensen, Z. Bochnicek, V. Holy // *Surface and Coatings Technology*. – 2001. – Vol. 142 – 144. – P. 590 – 595.
35. **Jensen, H.** Reactive sputtering of nanostructured multilayer coatings and their tribological properties [Text] / H. Jensen, G. Sorensen, I. Mannike, F. Muktepavela, J. Sobota // *Surface and Coatings Technology*. – 1999. – Vol. 116 – 119. – P. 1070 – 1075.
36. **Sobota, J.** Temperature stability of C-N/NbN nanocomposite multilayers [Text] / J. Sobota, G. Sorensen, H. Jensen, J. Kubena, V. Holy // *Diamond and Related Materials*. – 2000. – Vol. 9. – P. 587 – 591.
37. **Silva, E.** Structure-property relations in ZrCN coatings for tribological applications [Text] / E. Silva, M. Rebelo de Figueiredo, R. Franz, R. Escobar Galindo, C. Palacio, A. Espinosa, S. V. Calderon, C. Mitterer, S. Carvalho // *Surface and Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 205. – P. 2134 – 2141.
38. **Jensen H., Sobota J., Sørensen G.** // *Surface and Coatings Technology*. – 1997. – Vol. 94-95. – P. 174 – 178.
39. **Sobota, J.** Friction and wear properties of C-N/MeNx nanolayer composites [Text] / J. Sobota, Z. Bochnicek, V. Holy // *Thin Solid Films*. – 2003. – Vol. 433. - P. 155 – 159.

40. **Polcar, T.** The tribological characteristics of TiCN coating at elevated temperatures [Text] / T. Polcar, R. Novák, P. Široký // *Wear*. – 2006. – Vol. 260. – P. 40 – 49.
41. **Lackner, J. M.** Room temperature deposition of (Ti,Al)N and (Ti,Al)(C,N) coatings by pulsed laser deposition for tribological applications [Text] / J. M. Lackner, W. Waldhauser, R. Ebner, J. Keckés, T. Schöberl // *Surface and Coatings Technology*. – 2004. – Vol. 177 –178. – P. 447 – 452.
42. **Abraham, S.** Microstructure and mechanical properties of Ti-Si-C-N films synthesized by plasma-enhanced chemical vapor deposition [Text] / S. Abraham, E. Y. Choi, N. Kang, K. H. Kim // *Surface and Coatings Technology*. – 2007. – Vol. 202. – P. 915 – 919.
43. **Ma, S. L.** Synthesis and characterization of super hard, self-lubricating Ti-Si-C-N nanocomposite coatings [Text] / S. L. Ma, D. Y. Ma, Y. Guo, B. Xu, G. Z. Wu, K. W. Xu, P. K. Chu // *Acta Materialia*. – 2007. – Vol. 55. – P. 6350 – 6355.
44. **Gulbiński, W.** Structure and high-temperature tribological behavior of Ti-Si-C nanocomposite thin films [Text] / W. Gulbiński, T. Suszko, A. Gilewicz, B. Warcholiński, Z. Kukliński // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – Vol. 200. – P. 4179 – 4184.
45. **Gilmore, R.** Comparative investigation of multilayer TiB₂/C and co-sputtered TiB₂-C coatings for low-friction applications [Text] / R. Gilmore, M. A. Baker, P. N. Gibson, W. Gissler // *Surface and Coatings Technology*. – 1999. – Vol. 116–119. – P. 1127 – 1132.
46. **Hu, J. J.** Silver diffusion and high-temperature lubrication mechanisms of YSZ-Ag-Mo based nanocomposite coatings [Text] / J. J. Hu, C. Muratore, A. A. Voevodin // *Composites Science and Technology*. – 2007. – Vol. 67. – P. 336 – 347.
47. **Aouadi, S. M.** Tribological investigation of adaptive Mo₂N/MoS₂/Ag coatings with high sulfur content [Text] / S. M. Aouadi, Y. Paudel, W. J. Simon-

- son, Q. Ge, P. Kohli, C. Muratore, A. A. Voevodin // *Surface and Coatings Technology*. – 2009. – Vol. 203. – P. 1304 – 1309.
48. **Buck, V.** Morphological properties of sputtered MoS₂ films [Text] / V. Buck // *Wear*. – 1983. – V.91. – P. 81 – 88.
49. **Hilton, M. R.** Tribological performance and deformation of sputter-deposited MoS₂ solid lubricant films during sliding wear and indentation contact [Text] / M. R. Hilton, R. Bauer, P. D. Fleischauer // *Thin Solid Films*. – 1990. – V. 188. – P. 19 – 36.
50. **Jamison, W. E.** Friction characteristics of transition metal disulfides and diselenides [Text] / W. E. Jamison, S. L. Cosgrove // *A S L E Transactions*. – 1971. – V. 14. – P. 62 – 72.
51. **Spalvins, T.** A review of recent advances in solid film lubrication / T. Spalvins [Text] // *The Journal of Vacuum Science and Technology A* – 1987. – V. 5. – P. 12 – 19.
52. **Moser, J.** Crystal reorientation and wear mechanisms in MoS₂ lubricating thin films investigated by TEM [Text] / J. Moser, F. Levy // *Journal of Materials Research* – 1993. – V. 8. – P. 6 – 13.
53. **Spirko, J. A.** Electronic structure and reactivity of defect MoS₂: Relative stabilities of clusters and edges, and electronic surface states [Text] / J. A. Spirko, M. L. Neiman, A. M. Oelker, K. Klier // *Surface Science*. – 2003. – V. 542. – P. 192 – 204.
54. **Spalvins, T.** Tribological properties of sputtered MoS₂ films in relation to film morphology [Text] / T. Spalvins // *Thin Solid Films*. – 1980. – V. 73. – P. 91 – 97.
55. **Lauwerens, W.** Humidity resistant MoS₂ films prepared by pulsed magnetron sputtering [Text] / W. Lauwerens, J. Wang, J. Navratil, E. Wieers // *Surface and Coatings Technology*. – 2000. – V. 131. – P. 16 – 21.
56. **Roberts, E. W.** Advances in molybdenum disulphide film technology for space applications [Text] / E. W. Roberts, W. B. Price // *Proceedings of Eu-*

- ropean Space Mechanisms and Tribology Symposium. – 1996. – V. 6. – P. 73–78.
57. **Stupp, B. C.** Synergistic effects of metals co-sputtered with MoS₂ [Text] / B. C. Stupp // Thin Solid Films. – 1981. – V. 84. – P. 257 – 266.
58. **Zabinski, J. S.** Multi-environmental lubrication performance and lubrication mechanism of MoS₂/Sb₂O₃/C composite films [Text] / J. S. Zabinski, J. E. Bultman, J. H. Sanders, J. J. Hu // Tribology Letters. – 2006. – V. 23. – P. 55 – 63.
59. **Teer, D. G.** New solid lubricant coatings [Text] / D. G. Teer // Wear. – 2001. – V. 251. – P. 1068 – 1074.
60. **Renevie, N. M.** Advantages of using self-lubricating, hard, wear-resistant MoS₂-based coatings [Text] / N. M. Renevie, J. Hampshire, V. Fox, C. Witts, J. Allen, D. G. Teer // Surface and Coatings Technology. – 2001. – V. 142 – 144. – P. 67 – 77.
61. **Savan, A.** Use of nanoscaled multilayer and compound films to realize a soft lubrication phase within a hard, wear-resistant matrix [Text] / A. Savan, E. Pfluger, R. Goller, W. Gissler // Surface and Coatings Technology. – 2000. – V. 126. – P. 159 – 165.
62. **Gilmore, R.** Low-friction TiN–MoS₂ coatings produced by dc magnetron codeposition [Text] / R. Gilmore, M. A. Baker, P. N. Gibson, W. Gissler, M. Stoiber, P. Losbichler, C. Mitterer // Surface and Coatings Technology – 1998. – V. 108 – 109. – P. 345 – 351.
63. **Ding, X.** Unbalanced magnetron sputtered Ti–Si–N: MoS_x composite coatings for improvement of tribological properties [Text] / X. Ding, T. Zeng // Surface and Coatings Technology. – 2005. – V. 198. – P. 432 – 436.
64. **Gilmore, R.** Preparation and characterisation of low-friction TiB₂-based coatings by incorporation of C or MoS₂ [Text] / R. Gilmore, M. A. Baker, P. N. Gibson, W. Gissler // Surface and Coatings Technology. – 1998. – V. 105. – P. 45 – 50.

65. **Shtansky, D. V.** Structure and tribological properties of WSe_x , WSe_x/TiN , $WSe_x/TiCN$ and $WSe_x/TiSiN$ coatings [Text] / D. V. Shtansky, T. A. Lobova, V. Yu. Fominski, S. A. Kulinich, I. V. Lyasotsky, M. I. Petrzhlyk, E. A. Levashov, J. J. Moore // *Surface and Coatings Technology*. – 2004. – V. 183. – P. 328 – 336.
66. **Donnet, C.** Super-low friction of MoS_2 coatings in various environments [Text] / C. Donnet, J. M. Martin, Th. Le Mogne, M. Belin // *Tribology International*. – 1996. – V. 29. – P. 123 – 128.
67. **Shtansky, D. V.** Structure and properties of multi-component and multilayer $TiCrBN/WSe_x$ coatings deposited by sputtering of $TiCrB$ and WSe_2 targets [Text] / D. V. Shtansky, A. N. Sheveyko, D. I. Sorokin, L. C. Lev, B. N. Mavrin, Ph. V. Kiryukhantsev-Korneev // *Surface and Coatings Technology*. – 2008. – V. 202. – P. 5953 – 5961.
68. **Bowden, F. P.** *The Friction and Lubrication of Solids* [Text] / F. P. Bowden, D. Tabor. – New York : Oxford University Press, 2001. – P. 424.
69. **Arnell, R. D.** The effects of speed, film thickness and substrate surface roughness on the friction and wear of soft metal films in ultrahigh vacuum [Text] / R. D. Arnell, F. A. Soliman // *Thin Solid Films*. – 1978. – Vol. 53. – P. 333 – 341.
70. **Spalvins, T.** A review of recent advances in solid film lubrication [Text] / T. Spalvins // *The Journal of Vacuum Science and Technology A*. – 1987. – Vol. 5. – P. 212 – 219.
71. **Sliney, H. E.** The use of silver in self-lubricating coatings for extreme temperatures [Text] / H. E. Sliney // *ASLE Trans.* – 1986. – Vol. 29. – P. 370 – 376.
72. **Mulligan, C. P.** $CrN-Ag$ nanocomposite coatings: Tribology at room temperature and during a temperature ramp [Text] / C. P. Mulligan, T. A. Blanchet, D. Gall // *Surface and Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 204. – P. 1388 – 1394.

73. **Mulligan, C. P.** CrN–Ag nanocomposite coatings: High-temperature tribological response [Text] / C. P. Mulligan, T. A. Blanchet, D. Gall // *Wear*. – 2010. – Vol. 269. – P. 125 – 131.
74. **Mitterer, C.** Sputter-deposited Al–Au coatings [Text] / C. Mitterer, H. Lenhart, P. H. Mayrhofer, M. Kathrein // *Intermetallics*. – 2004. – Vol. 12. – P. 579 – 587.
75. **Патент РФ № 2148750.** Способ упрочнения зон кольцевых канавок поршня двигателя внутреннего сгорания [Текст] / Радченко М. В., Батырев Н. И., Кровяков К. С., Шевцов Ю. О. Заявл. 21.12.1998. Опубл. 10.05.2000.
76. **Радченко, М. В.** Получение упрочненных слоев на поверхности поршней из силуминов методом электроннолучевой наплавки [Текст] / М. В. Радченко, В. Г. Радченко, К. С. Кровяков // *Сварочное производство*. – 1999. – № 11. – С.48-51.
77. **Радченко, М. В.** Электроннолучевое упрочнение поршневого сплава АК21 [Текст] / М. В. Радченко, А. В. Зубков, Е. Н. Косоногов.- В кн.: *Электроннолучевая сварка*. – М., 1986. – С.27-30.
78. **Хаскин, В. Ю.** Применение лазерно-дуговой наплавки для заплавления узких полостей в изделиях из алюминиевых сплавов [Текст] / В. Ю. Хаскин // *Автоматическая сварка*. – 2009. – № 2. – С. 41 – 45.
79. **Шелягин, В. Д.** Гибридная лазерно-дуговая сварка углеродистых сталей и алюминиевых сплавов [Текст] / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, Т. Н. Набок // *Доп. НАН України*. – 2005. – № 7. – С. 97–102.
80. **Евстигнеев, В. В.** Разработка СВС-порошковых материалов и покрытий интерметаллидного класса для защиты поверхностей ответственных деталей [Текст] / В. В. Евстигнеев, В. И. Яковлев, В. Ю. Филимонов // *Обработка металлов (технология оборудование инструменты)*. – 2004. – № 2. – С. 9-10

81. **Филимонов, В. Ю.** Процессы структурообразования при детонационно-газовом нанесении защитных покрытий из композиционных порошков $TiAl_3$, Ni_3Al [Текст] / В. Ю. Филимонов, В. И. Яковлев, М. А. Корчагин, М. В. Логинова, А. С. Семенчина, А. В. Афанасьев // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44. № 5. С. 106-111.
82. **Christou, C.** Ionization of sputtered material in a planar magnetron discharge [Text] / C. Christou, Z. H. Barber // J. Vac. Sci. Tech. A – 2000. – V.18. – №.6. – P. 2897.
83. **Tracton, A. A.** Coatings Technology Handbook [Text] / A. A. Tracton // 3th Edition. CRC Press – 2007. – 936p.
84. **Ashfold, M. N. R.** Thin film diamond by chemical vapour deposition methods [Text] / M. N. R. Ashfold, P. W. May, C. A. Rego, N. M. Everitt // Chem. Soc. Rev. – 1994. – V. 23(1). – P.21.
85. **Белый, А. В.** Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев [Текст] / А. В. Белый, Г. Д. Карпенко, Н. К. Мышкин // М.: Машиностроение – 1991. – 209с.
86. **Радченко, М. В.** Исследование структуры и свойств поршневого алюминиевого сплава, обработанного электронным лучом [Текст] / М. В. Радченко, К. С. Кровяков // Сварочное производство. – 1998. – № 11. – С.9-12.
87. **Радченко, М. В.** Комплексный анализ износостойких защитных покрытий, наплавленных электронными пучками в вакууме [Текст] / М. В. Радченко, Ю. О. Шевцов, В. Г. Радченко // Ползуновский вестник. – 2005. – № 2.2. – С.67-71.
88. **Радченко, М. В.** Исследование характера коррозионного износа защитных покрытий, выполненных методом электроннолучевой наплавки порошковых сплавов в вакууме [Текст] / М. В. Радченко, Т. Н. Белянина // Перспективные материалы. – 1997. – № 6. – С.56-60.

89. **Бондарев, А. А.** Технология ремонта и восстановления изношенных поршней и других деталей машин и механизмов [Текст] / А. А. Бондарев // Сварщик. – 1999. – № 6. – С. 28.
90. **Radchenko, M. V.** Metallurgical coating made by electron beam surfacing [Text] / M. V. Radchenko, Yu .O. Shevtsov, N. I. Batyrev // 5 Int. Conf. On Electron beam techn. Varna, Bulgaria. – 1991. – P.487.
91. **Гоц, А. Н.** Повышение износостойкости шеек коленчатого вала [Электронный ресурс] / А. Н. Гоц // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – №6. Режим доступа: www.science-education.ru/100-5091/.
92. **Доржиев, В. Б.** Опыт применения воздушно-плазменного напыления при восстановлении шеек коленчатых валов [Текст] / В. Б. Доржиев, Ю. П. Аганаев // Пленки и покрытия-98. Труды 5-й международной конференции «Пленки и покрытия». – СПб.: Полиплазма. – 1998. С. 476–477.
93. **Леонтьев, Л. Б.** Разработка композиционных износостойких покрытий для пар трения «плунжер – втулка» топливных насосов высокого давления дизелей: монография [Текст] / Л. Б. Леонтьев, А. Л. Леонтьев, Н. П. Шапкин. – Владивосток : Издательский дом ДВФУ, 2012. – 103 с.
94. **Хмелевская, В. Б.** Технологии восстановления и упрочнения деталей судовых механизмов и триботехнические характеристики покрытий [Текст] / В. Б. Хмелевская, Л. Б. Леонтьев, Ю. Г. Лавров. – СПб. : СПГУВК, 2002. – 309 с.
95. **Шелягин, В. Д.** Гибридная сварка излучением CO₂-лазера и дугой плавящегося электрода в углекислом газе [Текст] / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, В. П. Гаращук // Автомат. сварка. – 2002. – № 10. – С. 38–41.
96. **Кривцун, И. В.** Гибридная лазерно-плазменная сварка алюминиевых сплавов [Текст] / И. В. Кривцун, В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин и др. // Автомат. сварка. – 2007. – № 5. – С. 49–53.

97. **Зяблов, О. К.** Применение лазерной технологии при ремонте коленчатых валов судовых двигателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.08.04 [Текст] / Зяблов Олег Константинович. – Нижний Новгород., 2000. – 21 с.
98. **Бондарев, А. А.** Технология упрочняющей наплавки с присадочным материалом зоны компрессионных канавок алюминиевых поршней [Текст] / А. А. Бондарев // Технологии. Материалы. Оборудование. – Киев : ИЭС им. Е. О. Патона, 2005. – С. 27–28.
99. **Воропай, Н. М.** Двухдуговая наплавка алюминиевых поршней комбинированным – неплавящимся и плавящимся электродом [Текст] / Н. М. Воропай, В. В. Лесных, В. А. Мишенков // Автомат. сварка. – 1996. – № 6. – С. 21–25.
100. **Бартенев, С. С.** Детонационные покрытия в машиностроении [Текст] / С. С. Бартенев, Ю. П. Федько, А. И. Григоров. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 215 с.
101. **Клименко, В. С.** Исследование процессов, происходящих в материалах детонационно-напыленных покрытий [Текст] / В. С. Клименко, Е. А. Астахов, А. И. Зверев // Труды 10-го Всесоюзного совещания по жаростойким покрытиям. – 1983. – С. 87.
102. **Хасуй, А.** Наплавка и напыление [Текст] / А. Хасуй, О. Моригаки / пер. с яп. В.И. Попова; под ред. В. С. Степина, И. Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
103. **Бондарев, А. А.** Технология ремонта изношенных поршней [Текст] / А. А. Бондарев // Сварщик. – 1999. – № 6. – С. 17.
104. **Зусин, В. Я.** Восстановление канавок алюминиевых поршней тракторных двигателей импульсно-дуговой наплавкой в среде защитных газов [Текст] / В. Я. Зусин, Г. Н. Вайнер, В. Н. Черноиванов // Свароч. пр-во. – 1982. – № 11. – С. 37–38.

105. **Кровяков, К. С.** Упрочнение кольцевых канавок поршня дизеля электроннолучевой обработкой [Текст] / К. С. Кровяков, М. В. Радченко // Техника машиностроения. – 2000. – № 3. – С.23-25.
106. **Ольшанский, Н. А.** Электроннолучевая сварка гильзы цилиндров дизельных двигателей [Текст] / Н. А. Ольшанский, В. Г. Радченко, М. В. Радченко, Д. М. Лихошерстов, Р. Ф. Балаян // Материалы 8 Всесоюзной конф. по электроннолучевой сварке. – М.,1983. – С.16-19.
107. **Радченко, М. В.** Практика использования концентрированных потоков энергии для сварки и создания защитных покрытий [Текст] / М. В. Радченко, С. Г. Уварова, Ю. О. Шевцов, Т. Б. Радченко, В. А. Марков // Ползуновский вестник. – 2012. – № 1/1. – С 248 – 254.
108. **Чудинов, Б. А.** Упрочнение верхней поршневой канавки поршней двигателей внутреннего сгорания ОАО «АВТОВАЗ» [Текст] / Б. А. Чудинов, В. Ф. Жмиевский // Материалы 6-й Междунар. практ. конф.-выставки. – С.-Пб., Альфаред, 2004. – С. 89 – 90.
109. **Радченко, М. В.** Комплексный анализ износостойких защитных покрытий, наплавленных электронными пучками в вакууме [Текст] / М. В. Радченко, Ю. О. Шевцов, В. Г. Радченко // Ползуновский вестник. – 2005. – № 2.2. – С.67-71.
110. **Путинцев, С. В.** Теоретические предпосылки снижения механических потерь в ЦПГ модификацией трущейся поверхности поршня [Текст] / С. В. Путинцев, М. Д. Пронин // Двигатель-2007 : Сб. научн. трудов межд. конф. – М., 2007. – С.218-220.
111. **Путинцев, С. В.** Теоретические основы профилирования боковой поверхности энергосберегающего поршня [Текст] / С. В. Путинцев, М. Д. Пронин // Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей : Материалы XI Межд. научно-практ. конф. – Владимир, 2008. – С. 216-220.

112. **Путинцев, С. В.** Теоретическое и расчетное обоснование снижения механических потерь профилированием и модификацией трущейся поверхности поршня ДВС [Текст] / С. В. Путинцев, М. Д. Пронин // Известия вузов. – Машиностроение. – 2008. – № 12. – С. 33-42.
113. **Путинцев, С. В.** Профилирование и модификация боковой поверхности поршня как способ снижения механических потерь в двигателе внутреннего сгорания [Текст] / С. В. Путинцев, М. Д. Пронин // Известия вузов. Машиностроение. – 2007. – №7. – С. 42-50.
114. **Радченко, М. В.** Исследование характера коррозионного износа защитных покрытий, выполненных методом электроннолучевой наплавки порошковых сплавов в вакууме [Текст] / М. В. Радченко, Т. Н. Белянина // Перспективные материалы. – 1997. – № 6. – С. 56-60.
115. **Бондарев, А. А.** Технология ремонта и восстановления изношенных поршней и других деталей машин и механизмов [Текст] / А. А. Бондарев // Сварщик. – 1999. – № 6. – С. 28.
116. **Radchenko, M. V.** Metallurgical coating made by electron beam surfacing [Text] / M. V. Radchenko, Yu. O. Shevtsov, N. I. Batyrev // 5 Int. Conf. On Electron beam techn. Varna, Bulgaria. – 1991. – P.487.
117. **Фикетт, У.** Введение в теорию детонации [Текст] / У. Фикетт. – М. : Мир, 1985. – 216 с.
118. **Богуслаев, В. О.** Детонационное нанесение покрытий на детали авиадвигателей и технологического оснащения с последующей магнито-абразивной обработкой (монография) [Текст] / В. О. Богуслаев, А. И. Долматов, П. Д. Жеманюк, А. И. Кулагин, В. Г. Михайлуца, В. А. Симоненко. – Запорожье : Дека, 1996. – 366 с.
119. **Астахов, Е. А.** Исследование технологических процессов детонационного нанесения покрытий из порошковых материалов [Текст] / Е. А. Астахов, А. Н. Краснов // Защитные покрытия на металлах. – 1971. - №12. – С. 73-86.

120. **Солоухин, Р. И.** Ударные волны и детонация в газах [Текст] / Р. И. Солоухин. – М. : Изд-во физ. мат. литературы, 1963. – 175 с.
121. **Харламов, Ю. А.** Детонационные покрытия в США [Текст] / Ю. А. Харламов. – Ворошиловград: Машиностроит. ин-т, 1979. – 50 с.
122. **Иванов, А. А.** Практические применения газотермических технологий нанесения защитных покрытий [Текст]: руководство для инженеров / А. А. Иванов. – М. : Машиностроение, 2009. – 65 с.
123. **Астахов, Е. А.** Дозирующие устройства для детонационного напыления [Текст] / Е. А. Астахов, А. И. Зверев, С. Ю. Шаривкер, В. И. Пашенко // Порошковая металлургия. – 1979. – № 3. – С. 75-78.
124. **Евстигнеев, В. В.** Получение и исследование наноструктурных детонационных покрытий на деталях машиностроения с использованием механокомпозитов типа TiB₂-Cu [Текст] / В. В. Евстигнеев, В. И. Яковлев, С. И. Гибельгауз, О. И. Ломовский, Д. В. Дудина, М. А. Корчагин // Ползуновский вестник. 2007. № 4. С. 155-161.
125. **Яковлев, В. И.** Экспериментально-диагностический комплекс для физических исследований порошковых СВС-материалов при детонационном напылении : Диссертация ... кандидата технических наук : 01.04.01. [Текст] / Владимир Иванович Яковлев. - Барнаул, 2003. - 162 с.
126. **Афанасьев, В. К.** Наплавочные сплавы [Текст]: учебное пособие / В. К. Афанасьев. – Кемерово : Полиграф, 2005. – 243 с.
127. **Евстигнеев, В. В.** Разработка СВС-порошковых материалов и покрытий интерметаллидного класса для защиты поверхностей ответственных деталей / Евстигнеев В. В. , В. И. Яковлев, В. Ю. Филимонов [Текст] // Обработка металлов (технология оборудование инструменты). - 2004. – № 2. – С. 9-10
128. **Ситников, А. А.** Структура и свойства наплавленных электродуговых покрытий из порошков механоактивированных СВС-композитов [Текст] / А. А. Ситников, В. И. Яковлев, М. Н. Сейдуров, М. Е. Татар-

- кин, А. В. Собачкин, Н. В. Степанова, И. Ю. Резанов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2011. – № 3 (52). – С. 51–54.
129. **Ситников, А. А.** Покрытия из механоактивированных СВС-материалов для рабочих органов сельскохозяйственных машин, наплавленные ручным дуговым способом [Текст] / А. А. Ситников, В. И. Яковлев, А. В. Собачкин, М. Н. Сейдуров, М. Е. Татаркин // *Ползуновский вестник*. – 2012. – № 1/1. – С. 273–277.
130. **Назаров, И. В.** Структура и свойства многокомпонентного механоактивированного базальтового порошка и покрытий на его основе [Текст] / И. В. Назаров, А. В. Собачкин, В. И. Яковлев, А. А. Ситников, Д. О. Мульти, О. Г. Ленивцева // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2012. – № 3 (56). – С. 137–140.
131. **Собачкин, А. В.** Морфология покрытий из многокомпонентных, предварительно механоактивированных порошков СВС-композитов [Текст] / А. В. Собачкин, И. В. Назаров, В. И. Яковлев, А. А. Ситников, П. С. Ярцев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2012. – № 3 (56). – С. 141–144.
132. **Собачкин, А. В.** Применение методов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и механоактивационной обработки для создания новых наплавочных материалов [Текст] / А. В. Собачкин, В. И. Яковлев, А. А. Ситников // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2012. – № 9. – С. 17–22.
133. **Попова, А. А.** Динамическая дифрактометрия фазовых превращений при высокотемпературном синтезе в порошковых механоактивированных системах в условиях объемного воспламенения [Текст] / А. А. Попова, А. В. Собачкин, И. В. Назаров, В. И. Яковлев, М. В. Логинова, А. А. Ситников, М. Р. Шарафутдинов, Н. З. Ляхов // *Известия РАН. Серия физическая*. – 2013. – Т. 77. – № 2. – С. 140–143

134. **ANSYS CFX-Solver Theory Guide.** Release 15.0 [Text]. – ANSYS, Canonsburg, PA 15317. – 372 p.
135. **Собачкин, А. В.** Алюмоматричные композиционные материалы, армированные углеродными дисперсными структурами [Текст] / 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.
136. **Собачкин, А. В.** Особенности формирования покрытий из алюмоматричного углеродсодержащего композиционного материала при газодетонационном напылении [Текст] / 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.
137. **Собачкин, А. В.** Газодетонационные покрытия юбки поршня двигателя внутреннего сгорания на основе алюмоматричного углеродсодержащего композиционного материала [Текст] / 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.
138. **Хрущов, М. М.** Нанокompозитная структура и трибологические свойства алмазоподобных покрытий, легированных хромом [Текст] / М. М. Хрущов, Е. А. Марченко, И. С. Левин, А. А. Дубравина, С. С. Букалов, Ю. А. Тарелкин // Вестник научно-технического развития. – 2014. – № 80. – С. 24-31.
139. **Макарова, Н. А.** Методика моделирования рабочего процесса дисмембратора для приготовления жидких кормов [Электронный ресурс] / Н. А. Макарова, А. А. Ситников // Горизонты образования. Научно-

образовательный журнал АлтГУ, выпуск 16. – Электронный ресурс. Режим доступа [http://edu.secna.ru/media/f/transport_sistem_tez_2014 .pdf](http://edu.secna.ru/media/f/transport_sistem_tez_2014.pdf)

140. **Ситников, А. А.** Определение скорости и температуры частиц алюмоматричного композиционного материала в двухфазном детонационно-газовом потоке [Текст] / 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.
141. **Собачкин, А. В.** Исследование параметров частиц алюмоматричного композиционного материала при газодетонационном напылении [Текст] / А. В. Собачкин, А. А. Ситников, В. И. Яковлев, А. П. Свиридов, Н. А. Яковлева // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 391–395.
142. **Собачкин, А. В.** 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.
143. **Собачкин, А. В.** Газодетонационное напыление юбки поршня ДВС алюмоматричными композиционными материалами с углеродными структурами [Текст] / 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. 76–81.

144. **Собачкин, А. В.** Антифрикционные газодетонационные покрытия поршня двигателя внутреннего сгорания на основе наноструктурированного композиционного материала [Текст] / 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.
145. **Собачкин, А. В.** Триботехнические свойства газодетонационных композиционных покрытий поршня двигателя внутреннего сгорания [Текст] / А. В. Собачкин, А. А. Ситников, В. И. Яковлев, А. П. Свиридов // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – №3. – С. 152–155.
146. **Собачкин, А. В.** Антифрикционные и износостойкие свойства газодетонационных покрытий из алюмоматричного композиционного материала на поршне двигателя внутреннего сгорания [Текст] / 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.
147. **Sobachkin, A. V.** Evaluation of Wear Resistance of Products on The Basis of Mechanically Activated Materials [Text] / A. V. Sobachkin, A. A. Sitenikov, A. P. Sviridov // Applied Mechanics and Materials. – Vol. 698 (2015) – P. 374-377.
148. **Жуков, М. Ф.** Высокотемпературные запыленные струи в процессах обработки порошковых материалов [Текст] / М. Ф. Жуков, О. П. Солоненко. – Новосибирск : ИТ СО АН СССР, 1990. – 516 с.

149. **Анциферов, В. Н.** Порошковая металлургия и напыленные покрытия [Текст] / В. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин и др. – М. : Металлургия, 1987. – 792 с.
150. **Шоршоров, М. Х.** Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий [Текст] / М. Х. Шоршоров, Ю. А. Харламов. – М. : Наука, 1978. – 227 с.
151. **Кулик, А. Я.** Газотермическое напыление композиционных порошков [Текст] / А. Я. Кулик, Ю. С. Борисов, А. С. Мнухин, М. Д. Никитин. – Л. : Машиностроение, 1985. – 199 с.
152. **Зверев, А. И.** Детонационное напыление покрытий [Текст] / А. И. Зверев, С. Ю. Шаривкер, Е. А. Астахов. – Л. : Судостроение, 1979. – 232 с.

Приложение А – Акт внедрения результатов диссертационной работы



АО "Барнаултрансмаш"
 Россия, 656037, г. Барнаул, пр. Калинина, 28
 Тел.: +7 (3852) 39-80-00, факс: +7 (3852) 39-80-01
 e-mail: SecrBTM@gaz.ru
www.gazgroup.ru, www.barnaultransmash.ru

 СМК сертифицирована в системе «Военный регистр»
 на соответствие ГОСТ ISO 9001-2011 и ГОСТ РВ 0015-002-2012

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
 АО «Барнаултрансмаш»



В.С. Силивакин

«18» октября 2017 года

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

в деятельности АО «Барнаултрансмаш»

Комиссия в составе: председатель, главный конструктор Бирюков Евгений Иванович, члены комиссии: от предприятия – главный инженер Лепин Андрей Владимирович, от разработчика – старший научный сотрудник Яковлев Владимир Иванович, старший научный сотрудник Собачкин Алексей Викторович, аспирант Свиридов Антон Петрович, составили настоящий акт о том, что результаты диссертационного исследования, посвященного повышению антифрикционных и износостойких свойств поршня ДВС с помощью газодетонационных покрытий на основе алюмоматричного материала, использованы в хозяйственной деятельности АО «Барнаултрансмаш» в следующем виде:

1. По разработанным рекомендациям производится получение алюмоматричных композиционных материалов, упрочненных углеродными

дисперсными составляющими, а так же газодетонационное напыление покрытий на юбку поршня ДВС.

2. Подобранные составы и режимы напыления обеспечивают получение качественного газодетонационного покрытия с удовлетворительным спектром физико-механических свойств (антифрикционные, износостойкие, адгезионные).

3. Применение поршней ДВС с покрытиями из алюмоматричных композиционных материалов позволяет снизить износ до 10% по сравнению с применяемыми технологиями.

Использование указанных результатов может позволить повысить качество предоставляемых услуг по изготовлению поршней дизельного двигателя внутреннего сгорания, а также оптимизировать трудозатраты технологического процесса производства поршня.

Председатель комиссии

Главный конструктор

Бирюков Е.И.

Члены комиссии:

Главный инженер

Лепин А.В.

Старший научный сотрудник

Яковлев В.И.

Старший научный сотрудник

Собачкин А.В.

Аспирант

Свиридов А.П.