

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.793

ЯЦКЕВИЧ
Ольга Константиновна

**ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ
КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ПЛАЗМЕННЫМ
НАПЫЛЕНИЕМ ПОРОШКОВ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ,
МОДИФИЦИРОВАННЫХ МОЛИБДЕНОМ И БОРОМ**

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Минск 2019

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

- Научный руководитель **ДЕВОЙНО Олег Георгиевич**,
доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, ОНИЛ «Плазменных и лазерных технологий» филиала БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт»
- Официальные оппоненты: **БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ Марат Артемович**,
доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»;
- ШЕВЦОВ Александр Иванович**,
кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Государственного научно-производственного объединения порошковой металлургии НАН Беларуси
- Оппонирующая организация УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»

Защита состоится 24 мая 2019 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, Минск, пр. Независимости 65, корпус 1, ауд. 202, тел. ученого секретаря (+375 17) 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 23 апреля 2019 года.

И.о. ученого секретаря совета
по защите диссертаций Д 02.05.03
доктор технических наук, профессор

И. А. Каштальян

© Яцкевич О. К., 2019
© Белорусский национальный
технический университет, 2019

ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых распространенных методов формирования покрытий различного функционального назначения является технология газотермического напыления, которая обеспечивает повышение износостойкости, коррозионной стойкости и теплостойкости рабочих поверхностей деталей машин и оборудования. По данным маркетинговых исследований, за последнее время мировой рынок газотермического напыления уже превысил 13 млрд долларов в год, в то время как в 2010 году он оценивался в размере лишь 4–5 млрд долларов. Согласно сложившейся к настоящему времени пропорции, основную долю способов газотермического напыления (около 45 %) составляет плазменное напыление. Высокая производительность, простота технологии, относительно низкая себестоимость нанесения покрытия, экологическая чистота процесса, возможность обработки деталей разнообразной конфигурации и габаритов, а также широкий диапазон наносимых материалов (металлы, сплавы, керамика) позволяют использовать плазменное напыление во многих областях техники.

Наиболее распространенными расходными материалами для газотермического напыления, включая плазменные способы, согласно данным одной из ведущих компаний в области нанесения защитных покрытий Oerlikon Metco, являются порошки, ежегодно их используется около 60–100 тыс. т. Значительную долю применяемых для плазменного напыления порошков составляют керамические материалы, используемые для формирования защитных покрытий с высокой твердостью, износостойкостью, химической стойкостью, низкой тепло- и электропроводностью. Типичные представители покрытий данного типа – плазменные керамические покрытия на основе широкодоступного и дешевого оксида алюминия (Al_2O_3). Основной недостаток, сдерживающий распространение износостойких покрытий данного типа, – низкая прочность сцепления с металлической основой вследствие значительного отличия в свойствах и наличия высоких остаточных напряжений после остывания покрытия, что может приводить к их растрескиванию и отслаиванию в процессе работы.

Анализ существующих методов повышения прочности сцепления керамических покрытий показал, что решение этой проблемы достигается как за счет подготовки поверхности, создания промежуточных переходных слоев и воздействия на уже сформированные покрытия, так и модифицирования самих напыляемых порошков. Среди указанных последний метод позволяет одновременно решать проблемы повышения прочности сцепления и обеспечивать управляемость свойствами формируемых покрытий.

Одним из перспективных методов модифицирования порошков является термодиффузионная обработка, осуществляемая путем выдержки смеси порошка с модифицирующими элементами во вращающемся с заданной частотой контейнере при постоянной температуре в печи. Термодиффузионная обработка порошка, направленная на получение композиционных частиц, состоящих из отличающихся по химическому составу сердцевин и внешнего слоя из модифицирующих элементов, широко используется для получения диффузионно-легированных металлических порошков. Однако процессы, протекающие при

модифицировании керамических материалов методом термодиффузионной обработки, ранее не изучались.

Порошки оксида алюминия, полученные указанным способом, могут быть использованы для плазменного напыления покрытий и при правильном подборе модифицирующих добавок обеспечить повышение прочности сцепления с металлической основой и улучшение триботехнических характеристик.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Научные исследования по теме диссертации проводились в рамках следующих научно-технических программ и ГППИ:

научно-исследовательской работы «Установление закономерностей формирования композиционных покрытий из оксидных легированных порошковых материалов» по договору № Т08-215 от 01.04.2008 № ГР 20082098;

ГППИ «Композиционные материалы», задание 4.05 «Разработка и исследование композиционных покрытий на основе керамик для обеспечения высоких физико-механических и эксплуатационных свойств» договор № 224 ГБ (1620-4) от 01.01.2009 № ГР 20093053;

научно-исследовательской работы «Исследование закономерностей формирования структуры и свойств покрытий из металлических оксидов различного функционального назначения комбинированными методами лазерно-плазменной обработки», договор № Т11ЛИТ-025 от 01.01.2011.

Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка технологии формирования износостойких керамических покрытий плазменным напылением порошков оксида алюминия, модифицированных молибденом (Al_2O_3-Mo) и бором (Al_2O_3-B), обеспечивающей повышение прочности их сцепления с металлической основой и улучшение триботехнических характеристик.

Для достижения цели потребовалось решение следующих задач:

1. Определить влияние технологических параметров термодиффузионной обработки порошков оксида алюминия молибденом и бором на структуру, фазовый состав и морфологию частиц.

2. Исследовать влияние технологических параметров плазменного напыления порошков оксида алюминия, модифицированных молибденом и бором, на физико-механические свойства керамических покрытий.

3. Определить влияние состава порошков, модифицированных молибденом и бором, на структуру и физико-механические свойства керамических покрытий.

4. Исследовать влияние состава и структуры керамических покрытий, полученных при плазменном напылении порошков оксида алюминия, модифицированных молибденом и бором, на триботехнические характеристики покрытий.

5. На базе проведенных исследований разработать технологический процесс формирования износостойких покрытий плазменным напылением порошков оксида алюминия, модифицированных молибденом и бором.

Научная новизна

Установлено, что термодиффузионная обработка порошков оксида алюминия с модифицирующими добавками приводит к формированию двух типов порошков, отличающихся по своей морфологии: один из которых (порошок Al_2O_3-B) можно отнести к плакированным, представляющим собой частицы оксида алюминия со сплошными пленками бора толщиной 2–5 мкм на поверхности, а другой (порошок Al_2O_3-Mo) к конгломерированным, состоящим из частиц оксида алюминия и равномерно распределенных по их поверхности частиц молибдена.

В результате экспериментальных исследований влияния технологических параметров термодиффузионной обработки на фазовый состав, физические и технологические свойства порошков установлено, что в процессе изотермической выдержки происходит фазовый переход $\gamma-Al_2O_3 \rightarrow \alpha-Al_2O_3$, причем наличие модифицирующих добавок (молибдена, бора) приводит к его интенсификации, что связано с увеличением скорости фазового превращения и снижением температуры его начала; изменение структуры и морфологии частиц приводит к улучшению технологических свойств порошков (текучести).

В результате компьютерного моделирования процессов нагрева частиц порошков оксида алюминия, модифицированных молибденом (Al_2O_3-Mo) и бором (Al_2O_3-B), в струе плазмы при напылении установлено, что при заданной мощности плазматрона наличие молибдена и бора на поверхности керамических частиц приводит к повышению интенсивности их нагрева по сравнению с исходным порошком, что связано с разными теплофизическими характеристиками. Определен гранулометрический состав частиц порошков Al_2O_3-Mo и Al_2O_3-B , при котором в процессе напыления достигается их разогрев до минимально необходимой температуры для образования в зоне контакта адгезионной связи с основой, что обеспечивает повышение прочности сцепления покрытий за счет образования химической связи со стальной подложкой (Fe_3Mo_2 , Fe_3B).

Экспериментально установлено влияние содержания модифицирующих элементов и фазового состава порошков Al_2O_3-Mo и Al_2O_3-B на триботехнические характеристики керамических покрытий, позволившие определить составы, обеспечивающие получение наибольшей износостойкости в условиях трения со смазочным материалом и без него, а также для различных скоростей скольжения и нагрузок. Установлено, что покрытия Al_2O_3-Mo с содержанием молибдена 6–8 % проявляют наибольшую износостойкость при низких скоростях в паре трения и высоких удельных давлениях 30–40 МПа. В свою очередь, при удельном давлении в паре трения порядка 10 МПа и скоростях более 10 м/с с целью получения наибольшей износостойкости рекомендуется применять покрытия Al_2O_3-B с содержанием бора 8–10 %, что объясняется образованием и сохранением пленок вторичных структур MoO_3 и B_2O_3 при указанных режимах.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментальных исследований влияния технологических параметров термодиффузионной обработки (скорости вращения контейнера с порошком и температуры изотермической выдержки в печи) на структуру, фазовый состав, размер, удельную поверхность и текучесть порошков оксида

алюминия, модифицированных молибденом ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$) и бором ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}$), позволившие установить их строение и состав при различных режимах термодиффузионной обработки; выбрать параметры, обеспечивающих получение порошков с необходимыми для плазменного напыления гранулометрическим составом и технологическими характеристиками.

2. Результаты оценки влияния модифицирующих элементов (молибдена, бора) и размеров частиц порошков $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}$ на кинетику их нагрева в плазменной струе, что позволило определить пределы дистанции напыления, а также диапазоны размеров частиц, для которых при нагреве в плазменной струе достигаются минимально необходимые для формирования адгезионной связи с основой значения температуры.

3. Результаты экспериментальных исследований влияния режимов плазменного напыления (ток дуги и дистанция напыления) и количества модифицирующих элементов в порошках $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}$ на прочность сцепления покрытий с основой, которые позволили установить режимы плазменного напыления, обеспечивающие получение наибольшей прочности сцепления для каждого из модифицированных порошков.

4. Результаты экспериментальных исследований влияния модифицирующих элементов на структуру и свойства плазменных покрытий $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}$ (прочность сцепления, пористость, твердость), что позволило для каждого из составов установить механизм формирования переходной зоны между покрытием и основой, а также получить эмпирические зависимости между составами покрытий и их свойствами.

5. Результаты экспериментальных исследований влияния модифицирующих добавок на триботехнические характеристики покрытий для различных условий трения (наличие смазочного материала, скорость, нагрузка), позволившие определить оптимальные составы, обеспечивающие получение наибольшей износостойкости в условиях трения со смазочным материалом и без него, а также для различных скоростей скольжения и удельных давлений.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные результаты диссертационной работы получены лично соискателем или при его непосредственном участии. Автором сформулированы положения, выносимые на защиту; разработаны методики исследований; выполнены исследования физико-механических и технологических свойств модифицированных порошков, а также физико-механических и эксплуатационных свойств керамических покрытий на основании данных, полученных методами металлографического, рентгеноструктурного, фазового и дюрOMETрического анализа; проведен анализ полученных результатов и осуществлена подготовка статей к публикации.

Совместно с научным руководителем работы, д.т.н., профессором О. Г. Девойно, выбрано научное направление и определены задачи исследования, проведены комплекс исследований и апробирование результатов в производстве. Д.т.н., профессор В. М. Константинов оказывал консультативную помощь при отработке способа модифицирования керамических порошков. К.т.н., доцент М. А. Кардаполова оказывала консультативное и практическое содействие при

проведении металлографических исследований, расшифровке данных рентгеноструктурного анализа. Д.т.н., профессор Е. Э. Фельдштейн оказывал помощь при исследовании интенсивности изнашивания и коэффициентов трения в широком диапазоне скоростей и удельных нагрузок.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения, выводы и рекомендации диссертационной работы докладывались и получили положительные отзывы на следующих международных научно-технических конференциях: «Машиностроение и техносфера XXI века» (Севастополь, 2006, 2010, 2011, 2013 гг.); «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия» (Минск, НАН Беларуси, Институт порошковой металлургии, 2006); «Пленки и покрытия 2007» (Санкт-Петербург, 2007); «Инженерия поверхностного слоя деталей машин» (Минск, 2010); «Наука–образованию, производству, экономике» (Минск, 2016); «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» (Минск, 2015); «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта» (Санкт-Петербург, 2015).

Результаты исследований использованы при разработке технологии упрочнения деталей «Шарнир» механизма открывания водонагревательного котла на предприятии ОАО «ГСКБ» по комплексу оборудования для микроклимата (Брест) и «Вал», являющийся осью счетчика расхода рабочей среды нефтедобывающего оборудования, на предприятии ООО «Восточный Вектор Про» (Минск); в учебном процессе на кафедре «Технология машиностроения» БНТУ при подготовке курса лекций по дисциплине «Теория и практика нанесения защитных покрытий».

Опубликование результатов диссертации

Основные результаты исследований опубликованы в 21 работе. В том числе в 9 статьях в изданиях, входящих в Перечень ВАК Республики Беларусь (3,31 авторского листа), в 1 статье в сборнике научных трудов и 8 статьях в сборниках и материалах научных конференций, в 2 тезисах докладов и 1 патенте Республики Беларусь.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 5 глав, выводов, списка использованных источников и приложения. Работа содержит 176 страниц, в том числе 100 страниц машинописного текста, 52 рисунка, 20 таблиц, 17 страниц списка источников (189 наименований, из них 21 публикация соискателя), 7 приложений на 27 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и новизна диссертационного исследования, перспективность поставленных научно-исследовательских задач.

В первой главе проведен анализ данных по существующим методам нанесения защитных износостойких покрытий деталей машин. Показано, что определенное место в этой области занимают процессы плазменного напыления порошков, среди которых важная роль принадлежит керамическим порошкам на основе широко доступного оксида алюминия, давно зарекомендовавшего себя в качестве материала для нанесения электроизоляционных, коррозионно-стойких, теплозащитных покрытий. Однако на сегодняшний день наиболее перспективным является применение керамических покрытий на основе оксида алюминия для защиты от износа поверхностей деталей в парах трения, особенно при высоких температурах и в условиях действия агрессивных сред там, где металлические покрытия теряют свою работоспособность.

Тем не менее при использовании данных покрытий в качестве износостойких в условиях абразивного трения, трения со смазочным материалом и без него необходимо устранить такие недостатки, как хрупкость и низкая прочность сцепления с металлической основой, которые сужают область их применения. Показано, что повышение прочности сцепления керамических покрытий из оксида алюминия может быть достигнуто за счет как подготовки поверхности, создания промежуточных переходных слоев и воздействия на уже сформированные покрытия, так и модифицирования самих порошков для плазменного напыления. Кроме того, использование модифицированных порошков позволяет одновременно решать проблемы как с повышением прочности сцепления, так и с обеспечением требуемых триботехнических характеристик формируемых покрытий.

Установлено, что существующие на сегодняшний момент технологии получения керамических порошков с заданными технологическими характеристиками (например, плазменная сфероидизация) могут быть достойно заменены более дешевым методом создания композиционных частиц на основе оксида алюминия, использующим в качестве исходного сырья широкодоступный глинозем. Разработка нового метода модифицирования керамических порошков путем термодиффузионной обработки в подвижных насыщающих смесях, ранее применяемого для производства металлических порошков, представляет реальный практический интерес с точки зрения получения качественных порошков для плазменного напыления покрытий, не требующих дополнительной технологической подготовки (измельчения, гранулирования, сфероидизации).

Анализ исследований, посвященных вопросу плазменного напыления керамических покрытий, свидетельствует, что применение порошков оксида алюминия, модифицированных методом термодиффузионной обработки, позволяет в зависимости от вида добавки и режимов получать порошки с улучшенными технологическими свойствами, что окажет влияние на процесс плазменного напыления, а также на выходные свойства формируемых покрытий, такие как прочность сцепления с основой и износостойкость.

На основании проведенного анализа сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы

Во второй главе обоснован выбор модифицирующих добавок для термодиффузионной обработки порошков оксида алюминия с учетом: реальных условий эксплуатации; необходимости обеспечения заданного комплекса свойств формируемых керамических покрытий; технологических возможностей самого способа термодиффузионной обработки. Установлено, что наиболее перспективными модифицирующими добавками для метода термодиффузионной обработки порошков оксида алюминия, позволяющими увеличить прочность сцепления формируемых покрытий со стальной основой и улучшить триботехнические характеристики, являются молибден и бор.

Для термодиффузионной обработки керамических порошков использовали порошок оксида алюминия марки – Г–0 по ГОСТ 30558–98 с размером частиц 60–80 мкм. Порошок металлического молибдена соответствует ТУ 48-19-316–80 с содержанием молибдена не менее 97,5 %, размер частиц 12–20 мкм. Бор использовали в аморфном виде, марка Б-99А по ТУ 1-92-154–90.

Термодиффузионную обработку керамического порошка проводили на лабораторной установке, созданной на основе печи СНОЛ, при температурах 600–1100 °С и выдержках 0,5–6 ч в герметизируемых вращающихся контейнерах из жаростойкой стали 12Х18Н9Т диаметром 55 мм и длиной 120 мм. Частоту вращения и степень заполнения контейнера для конкретного вида порошка рассчитывали исходя из математической модели поведения частиц во вращающемся контейнере при условии обеспечения максимального перемешивания, неспекаемости смеси и равномерности процесса насыщения.

В качестве технологического оборудования для плазменного напыления покрытий использована установка УПУ-3Д с источником питания ИПН-160/600 и плазмотроном ПП-25, плазмообразующий и транспортирующий газ азот. Напряжение дуги 80–90 В, силу тока варьировали в пределах 320–420 А, объемный расход плазмообразующего газа $G = 2-3$ м³/ч. Покрытия наносили на образцы из стали 45. Толщина покрытия – 0,7–0,8 мм. Температуру разогретых в плазменном потоке частиц определяли при напылении по методике многоцветовой температуры. Интенсивность излучения в выделенных с помощью узкополосных светофильтров участках спектра регистрировали светолучевым осциллографом Н-700. Полученные значения использовали для оценки температуры частиц.

Металлографический анализ порошков и образцов с покрытиями проводили на световом металлографическом микроскопе Unimet (Япония). Исследование элементного состава проводили на сканирующих электронных микроскопах Mira фирмы Tescan (Чехия) и VEGA II LMU с микрорентгеноспектральным анализатором INCA Energy 350 и приставкой Spectro Scan Max-GV.

Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре «ДРОН-3,0» при непрерывной съемке в строго идентичных условиях при скорости поворота образца 1 град/мин в медном монохроматизированном излучении.

Гранулометрический состав керамического порошка определяли ситовым методом по ГОСТ 25469–93, удельную поверхность исходного и модифициро-

ванных порошков определяли методом БЭТ на анализаторе поверхности и размера пор SA 3100 фирмы Beckman Coulter (США), текучесть определяли по ГОСТ 20899–98 путем измерения времени истечения навески порошка.

Микротвердость керамических покрытий измеряли на приборе ПМТ-3 при величине статической нагрузки 100 г (0,98 Н) (ГОСТ 9450–76). Пористость покрытий определяли методом гидростатического взвешивания со свободной пропиткой образца в масле. Микрогеометрия (параметр Ra) образцов измерена профилографом-профилометром модели 252 по ГОСТ 2789–73.

Для определения прочности сцепления покрытия с основой использовали метод штифтовой пробы. Отрыв покрытия от основы на образцах осуществляли на разрывной машине RIENLE с одновременным измерением усилия отрыва. Напряженное состояние покрытий оценивали по величине прогиба призматических образцов.

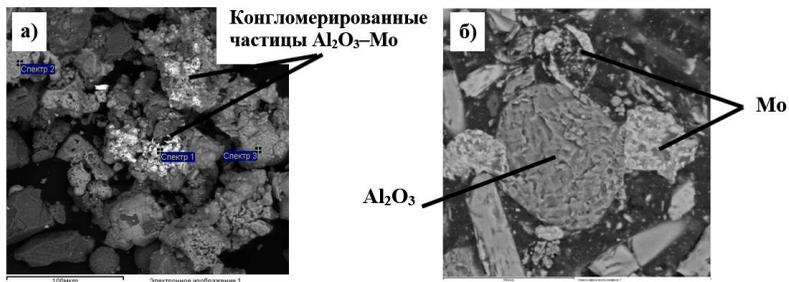
Сравнительные экспресс-испытания на износостойкость проводили на установке торцевого трения при линейной скорости 5–15 м/мин и нагрузке 20–300 Н, контртело выполнено из твердого сплава ВК-6. Величину износа определяли по глубине лунки с помощью профилографа-профилометра модели 252. Исследования износостойкости и коэффициента трения для различных условий нагружения при трении со смазкой и без нее проведено на машине трения типа Amsler A-135 по PN-79/H-04329 по схеме ролик (закаленная сталь 45) – плоский образец с покрытием. Скорость скольжения в паре трения составила 0,46–12 м/с, удельная нагрузка 0,5–45 МПа, путь трения составил 1000 м при трении без смазочного материала и 2000 м при трении без него.

Численную оценку температуры модифицированных частиц в плазменном потоке с учетом размеров и изменившихся теплофизических характеристик осуществляли с использованием пакета прикладных программ для моделирования поведения частиц порошка в процессе плазменного напыления CASPSP.

Третья глава посвящена исследованию влияния термодиффузионной обработки на структуру, физико-механические и технологические свойства порошков оксида алюминия, модифицированных молибденом и бором. Установили, что термодиффузионная обработка оксида алюминия с модифицирующими добавками приводит к формированию двух отличных по своей морфологии типов порошков: один из них можно отнести к конгломерированным (Al_2O_3 –Mo), состоящим из крупных частиц оксида алюминия и закрепленных на них мелких частиц молибдена (рисунок 1), а другой к плакированным (Al_2O_3 –B), состоящим из частиц оксида алюминия с тонкими сплошными пленками бора толщиной 2–5 мкм на поверхности частиц (рисунок 2). Изменение морфологии частиц происходит в результате конкурирующих процессов: разрушения частиц при нагреве; объемной усадки при фазовом переходе $\gamma-Al_2O_3 \rightarrow \alpha-Al_2O_3$; конгломерирования при перемешивании порошковой смеси во вращающемся контейнере; спекания при изотермической выдержке.

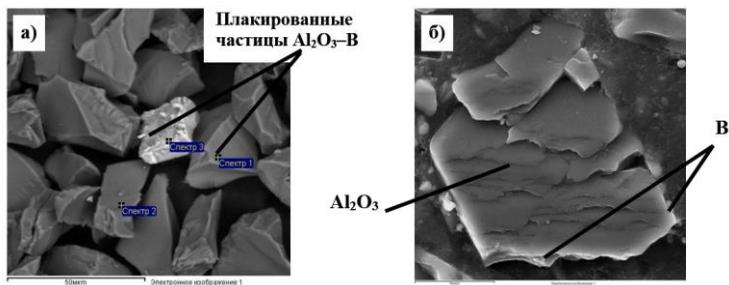
В случае модифицирования молибденом активация поверхности частиц оксида алюминия при термическом разложении способствует налипанию и закреплению пластически деформированных частиц металлического молибдена.

В результате формируется конгломерированная частица без дополнительного использования связующих веществ (рисунок 1б).



а – топография поверхности частиц; **б** – поперечное сечение частицы
Рисунок 1. – Микроструктура порошка оксида алюминия, модифицированного молибденом ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$)

В случае модифицирования аморфным бором формирование конгломерированных частиц не происходит. Частицы оксида алюминия приобретают форму прямоугольных, ромбических и гексагональных призм (рисунок 2а). МРСА показывает наличие бора на поверхности частицы в виде пленок толщиной 2–5 мкм (рисунок 2б).



а – топография поверхности частиц; **б** – поперечное сечение частицы
Рисунок 2. – Микроструктура порошка оксида алюминия, модифицированного бором ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$)

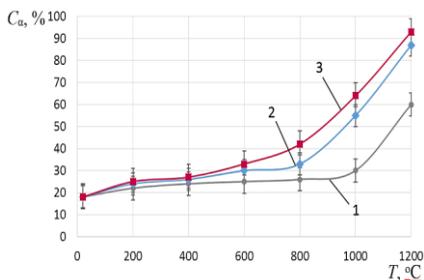
Химическое взаимодействие модифицирующих элементов с оксидом алюминия с образованием диффузионных слоев не происходит, что подтверждается данными рентгеноструктурного анализа.

Установлено, что к параметрам термодиффузионной обработки, влияющим на морфологию и свойства получаемых порошков, относятся: степень заполнения контейнера порошковой смесью, частота вращения контейнера, время обработки. Причем размер, фазовый состав и структура модифицированных частиц зависят от выбранной температуры изотермической выдержки в печи. Термодиффузионная обработка приводит к изменению фазового состава моди-

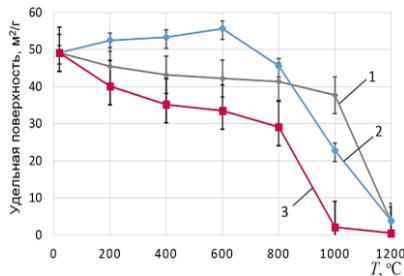
фицированных частиц в сторону увеличения содержания высокотемпературной фазы ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$): с 30 % в исходном до 60 % в модифицированном порошке $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$ и 70 % в порошке $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ по отношению к низкотемпературной фазе ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$). Причем наличие активированных частиц молибдена и бора, взаимодействующих с частицами оксида алюминия, повышает скорость и снижает температуру начала фазового перехода $\gamma \rightarrow \alpha$ со 1100–1200 до 800 °C (рисунок 3), что может быть объяснено влиянием добавок на диффузию катионов алюминия в анионной подрешетке кислорода. Плазменные покрытия в значительной мере наследуют фазовый состав порошков оксида алюминия, поэтому повышение содержания $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ считается положительным эффектом.

Изменение температуры изотермической выдержки при термодиффузионной обработке оказывает влияние не только на фазовый состав, но и на размер частиц модифицированных порошков $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$, изменяющийся в результате перестроения кристаллической решетки и уменьшения ее объема при фазовом переходе $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$; в результате термического разложения при нагреве более 800 °C, свойственного частицам гидроксида и оксида алюминия; под действием напряжений, возникающих при локальном пластическом деформировании в подвижной порошковой среде.

Кроме того, установлено, что термодиффузионная обработка приводит к изменению физических и технологических характеристик модифицированных порошков. Уменьшение удельной поверхности (рисунок 4) может быть связано с изменением геометрических параметров поверхностного слоя формируемых частиц: сглаживанием неровностей на поверхности частиц оксида алюминия при налипании пластически деформированных частиц металлического молибдена ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$) и при разрушении по кристаллическим плоскостям частиц оксида алюминия с образованием плоских граней ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$).



1 – Al_2O_3 ; 2 – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$; 3 – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$
Рисунок 3. – Зависимость содержания фазы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в модифицированных порошках от температуры изотермической выдержки при обработке в течение 2 часов



1 – Al_2O_3 ; 2 – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$; 3 – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$
Рисунок 4. – Зависимость удельной поверхности модифицированных порошков от температуры изотермической выдержки

Изменение морфологии частиц и уменьшение удельной поверхности порошков при термодиффузионной обработке приводит к улучшению их текучести, что оказывает влияние на равномерность подачи и степень прогрева порошка в плазменной струе и, как следствие, повышает эффективность и производительность процесса плазменного напыления. Текучесть порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ составила 28,5 с, порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$ – 20,5 с, по сравнению с текучестью исходного порошка – 52,5 с.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния режимов плазменного напыления и состава модифицированных порошков на структуру и свойства плазменных покрытий. На первом этапе проведено компьютерное моделирование процессов нагрева частиц порошков оксида алюминия, модифицированных молибденом ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$) и бором ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$) в струе плазмы с использованием

пакета прикладных программ CASPS с целью определения их температур с учетом изменившихся теплофизических характеристик (рисунок 5).

В результате анализа полученных данных установлено, что присутствие бора и молибдена на поверхности керамических частиц при заданной мощности напыления может оказывать значительное влияние на кинетику нагрева, повышая температуру керамической сердцевины частиц $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ на 500–600 °С, а частиц $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$ на 100–150 °С, за счет поддержания более высокой температуры на ее поверхности до момента соударения с материалом основы, что подтверждается результатами проведенных экспериментальных оценок.

Расчетные значения температур нагрева модифицированных частиц использованы для определения минимально необ-

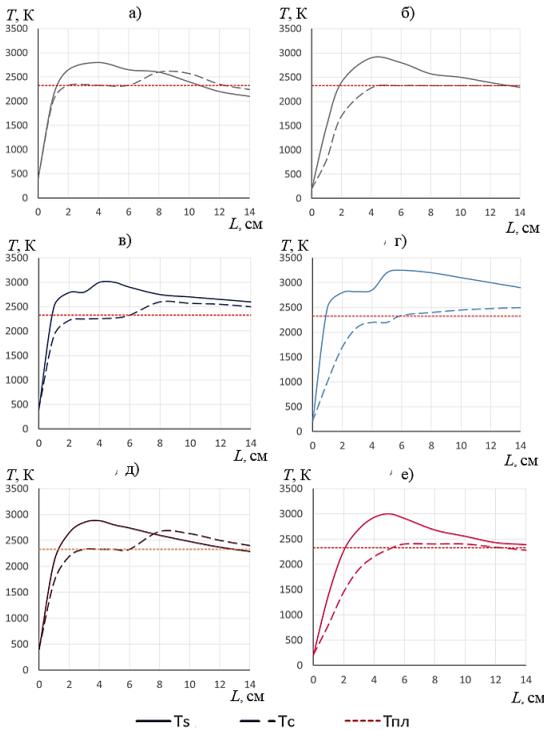
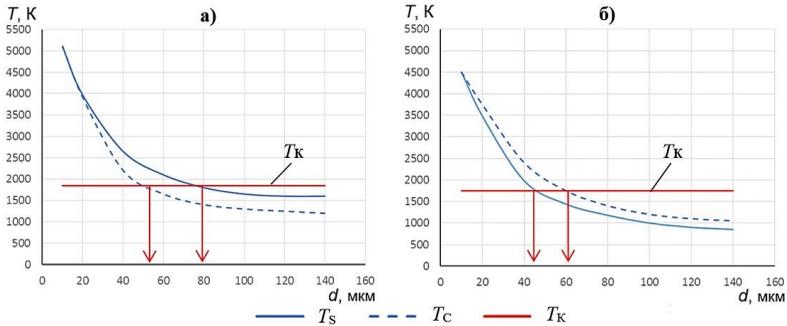


Рисунок 5. – Численные оценки температуры наружной поверхности (T_s) и сердцевины (T_c) частиц порошка исходного Al_2O_3 (а, б), частиц модифицированных порошков $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ (в, г) и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$ (д, е) с размерами $d = 40$ мкм (а, в, д) и $d = 100$ мкм (б, г, е) в зависимости от дистанции напыления

ходимой для формирования достаточной адгезионной связи температуры в зоне контакта нагретой частицы с материалом основы, составляющей порядка 1574 °С для порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$ и 1433 °С для $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}$. Используя полученные с помощью программы CASPS значения температур нагрева наружной поверхности (T_s) и сердцевины (T_c) модифицированных частиц в плазменной струе определены диапазоны их размеров, составляющие: 60–80 мкм для порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$ (рисунок 6а); 40–60 мкм для $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}$ (рисунок 6б), при которых частицы в плазменной струе могут нагреваться до температуры, обеспечивающей достижение требуемой температуры в контакте с материалом основы.



а – частицы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$; б – частицы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}$

Рисунок 6. – Влияние размера модифицированных частиц на температуру нагрева наружной поверхности (T_s) и сердцевины (T_c) в плазменной струе

Верификация полученных численных оценок проводилась путем выполнения серии экспериментов согласно матрице планирования для метода полного факторного эксперимента. Входными параметрами для каждого из исследуемых составов являются сила тока (X_1), дистанция напыления (X_2), содержание модифицирующего элемента (X_3), а параметром оптимизации - значение прочности сцепления покрытий с основой (Y). Уравнения регрессии имеют следующий вид:

а) для покрытия $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}$:

$$Y_1 = 16,9417 + 1,6333X_1 - 1,8333X_2 + 4,5583X_3 - 0,775X_1X_2 + 0,1833X_1X_3 + 0,15X_2X_3, \quad (1)$$

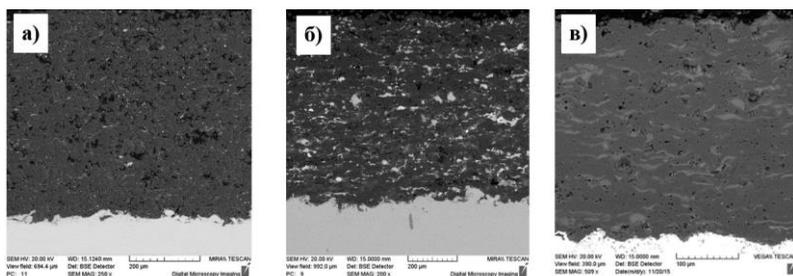
б) для покрытия $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$:

$$Y_2 = 18,5042 + 1,5042X_1 - 1,1042X_2 + 5,7208X_3 - 0,8042X_1X_2. \quad (2)$$

Из перечисленного выше следует, что наибольшее влияние на прочность сцепления покрытий $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}$ с основой по сравнению с током дуги и дистанцией напыления оказывает содержание модифицирующих элементов. Причем, для обеспечения наибольшей прочности сцепления исследуемые композиции имеют свои оптимальные значения параметров плазменного напыления в заданном диапазоне. При значении силы тока дуги плазматрона 420 А дистан-

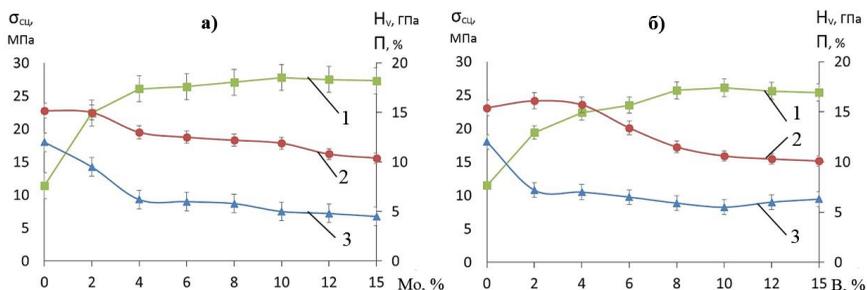
ция напыления для порошков должна составлять: 100–120 мм от среза сопла для $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$; 80–100 мм для порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}$. Наибольшая прочность сцепления для исследуемых композиций может быть получена при содержании модифицирующих элементов в исходном порошке 15 %.

При напылении порошков $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$ вокруг частиц керамики образуются тонкие прослойки молибдена с поперечным сечением менее 1 мкм, что способствует заполнению пор и формированию плотного покрытия по сравнению с покрытием из исходного порошка оксида алюминия (рисунок 7а, б). В покрытии, полученном из порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}$, также выявлена однородная мелкозернистая структура с незначительным количеством пор (рисунок 7в).



а – Al_2O_3 ; б – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$; в – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}$
Рисунок 7. – Микроструктуры исследуемых покрытий

В результате экспериментальных исследований влияния модифицирующих добавок на структуру и свойства покрытий установлено, что введение молибдена и бора позволяет снизить пористость покрытий в 2–2,2 раза (с 11,9 до 5,4 % для покрытий $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$ и до 5,9 % для покрытий $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}$) (рисунок 8).



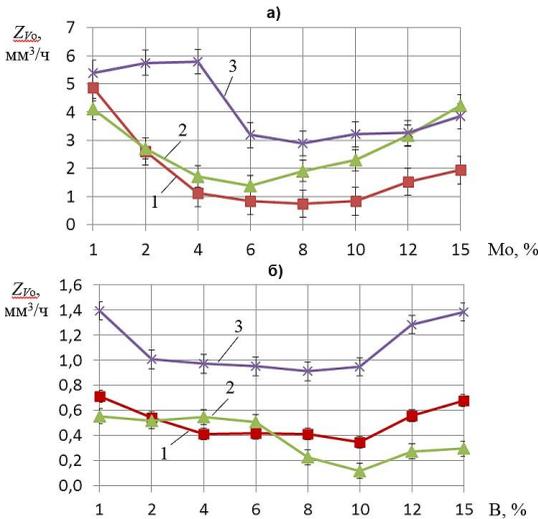
1 – прочность сцепления $\sigma_{сц}$, МПа; 2 – микротвердость H_v , ГПа; 3 – пористость П, %
Рисунок 8. – Влияние содержания модифицирующих элементов на физико-механические свойства плазменных покрытий $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$ (а) и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}$ (б)

Наличие молибдена в покрытии приводит к повышению прочности сцепления керамических покрытий на основе оксида алюминия в 2,2–2,4 раза за счет

образования химической связи со стальной подложкой (Fe_3Mo_2). В случае напыления порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-В}$ при контакте расплавленных частиц с подложкой предположительно имеет место эффект контактного эвтектического плавления подложки (температура эвтектики Fe-V составляет порядка 975°C), что обеспечивает повышение прочности сцепления в 2,2–2,3 раза по сравнению с покрытием из не модифицированного порошка. Рентгеноструктурный анализ выявил наличие борида железа $\text{Fe}_3\text{В}$ в покрытии со стороны материала основы.

В пятой главе проведены исследования эксплуатационных характеристик покрытий с целью определения рациональных режимов работы для обеспечения наибольшей износостойкости. В результате экспериментальных исследований влияния модифицирующих добавок на триботехнические характеристики установлено, что наибольшую износостойкость в условиях трения без смазочного материала показывают покрытия с содержанием молибдена 6–8 % и бора 8–10 % (по массе) (рисунок 9), что объясняется повышением содержания гексагональной фазы ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), а также образованием пленок оксидов MoO_3 и V_2O_3 на поверхностях трения, выступающих в роли твердого смазочного материала и снижающих коэффициент трения.

Проведено исследование зависимости интенсивности изнашивания и коэффициента трения керамических покрытий $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-В}$ от параметров, характеризующих условия работы трибосопрежений, установлены наиболее



1 – $V = 5$ м/мин; 2 – 10 м/мин; 3 – 15 м/мин
нагрузка 300 Н, время 60 мин,
трение без смазочного материала

Рисунок 9. – Зависимость интенсивности изнашивания покрытий $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ (а) и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-В}$ (б) от содержания модифицирующего элемента

благоприятные режимы, обеспечивающие наименьший коэффициент трения и наибольшую износостойкость узла при эксплуатации. Установлено, что покрытия $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ с содержанием молибдена 6–8 % проявляют наибольшую износостойкость при низких скоростях в паре трения и высоких удельных давлениях порядка 30–40 МПа. В свою очередь, при удельных давлениях в паре трения порядка 10 МПа и высоких скоростях (более 10 м/с) рекомендуется применять покрытия $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-В}$ с содержанием бора 8–10 %. Указанные эффекты могут быть объяснены образованием и сохранением пленок вторичных структур на основе оксидов (MoO_3 , V_2O_3) на

поверхностях трения в установленных диапазонах значений скоростей и удельных давлений в паре трения.

Результаты исследований послужили основой для разработки технологической инструкции нанесения покрытий плазменным напылением порошков оксида алюминия, модифицированных молибденом ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$) и бором ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$) на рабочие поверхности деталей из конструкционных сталей, включающая следующие технологические операции: подготовку порошков, (модифицирование молибденом и бором методом термодиффузионной обработки); подготовку напыляемой поверхности (дробеструйной обработкой); нанесение покрытия (плазменным напылением порошков оксида алюминия, модифицированных молибденом и бором); механическую обработку (шлифование покрытия); контроль качества покрытия (визуальный осмотр изделия с покрытием, контроль твердости и прочности сцепления на образцах-свидетелях).

Выбор режимов модифицирования порошков методом термодиффузионной обработки осуществляли из необходимости получения частиц установленных размеров: 40–60 мкм – для композиции $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$; 60–80 мкм – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$. Данные размеры позволяют частицам при нагреве в плазменном потоке достигнуть температуры, достаточной для установления в зоне контакта с материалом основы минимально необходимой температуры (T_k), при которой может возникнуть химическое взаимодействие расплавленной модифицированной частицы с металлом. Таким образом, для получения заданных размеров модифицированных порошков в контейнер следует загружать порошок глинозема с размером частиц основной фракции 60–80 мкм при степени заполнения объема рабочего контейнера 60 %, а термодиффузионную обработку производить при скорости вращения контейнера 40 мин⁻¹ и времени изотермической выдержки 3 часа. Температура изотермической выдержки устанавливается в зависимости от необходимой грануляции и составляет: 800–900 °С – для порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$; 900–1000 °С – для порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$.

Выбор режимов плазменного напыления производили из условия достижения наибольшей прочности сцепления покрытия с основой при использовании уравнений регрессии (1) и (2). Значения технологических режимов составили: $L = 80$ мм, $I = 420$ А для модифицированного порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$; $L = 120$ мм, $I = 420$ А для модифицированного порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$.

Разработанная технология прошла апробирование и послужила основой для создания технологических процессов нанесения покрытий плазменным напылением: порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$ на детали «Вал 45.70.00.001» и «Вал СМБ.73М.80.00.034» для предприятия ООО «Восточный Вектор Про»; порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ на деталь «Шарнир» механизма открывания газовой горелки водонагревательного котла для предприятия ОАО «ГСКБ» по комплексу оборудования для микроклимата. Проведенные опытно-промышленные испытания шарниров с нанесенными на поверхности трения керамическими покрытиями $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ показали, что предложенная технология увеличивает ресурс работы шарниров в узле в 3–3,5 раза. Экономический эффект от внедрения технологического процесса на предприятии ОАО «ГСКБ» по комплексу оборудования для микроклимата составил в ценах 2015 года 865 100 тыс. руб/год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. В результате экспериментальных исследований влияния технологических параметров термодиффузионной обработки (скорости вращения контейнера с порошком и температуры изотермической выдержки в печи) на морфологию частиц порошков оксида алюминия, модифицированных молибденом и бором установлено, что термодиффузионная обработка в подвижной порошковой среде приводит к формированию двух типов порошков: один из них можно отнести к плакированным ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-В}$), представляющим собой частицы оксида алюминия со сплошными пленками бора толщиной 2–5 мкм на поверхности, а другой – к конгломерированным ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Мо}$), состоящим из частиц оксида алюминия и закрепленных на них мелких деформированных частиц молибдена, что связано с протеканием конкурирующих процессов: разрушения частиц при нагреве за счет объемной усадки при фазовом переходе $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$; конгломерирования при перемешивании порошковой смеси во вращающемся контейнере; спекания при изотермической выдержке [5, 6].

2. Экспериментально установлено влияние технологических параметров термодиффузионной обработки на фазовый состав, физические и технологические свойства порошков, установлено, что происходит изменение соотношения между количеством фаз низкотемпературной ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) и имеющей высокую твердость высокотемпературной ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), содержание которой выросло с порядка 30 % в исходном порошке до 60 % в модифицированном порошке $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-В}$ и 70 % в порошке $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Мо}$, что связано с увеличением скорости фазового превращения и снижением температуры его начала. Изменение температуры изотермической выдержки в пределах 800–1000 °С оказывает влияние не только на фазовый состав, но и на размер частиц модифицированных порошков, изменяющийся в результате перестроения кристаллической решетки и уменьшения ее объема при фазовом переходе $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, а также под действием напряжений, возникающих при локальном пластическом деформировании в подвижной порошковой среде. Выявлено, что наилучшие технологические характеристики порошков с точки зрения процесса плазменного напыления обеспечиваются при термодиффузионной обработке с частотой вращения контейнера 40 мин⁻¹, временем выдержки 2 ч при температуре 900–1000 °С для порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-В}$, позволяющей получить частицы с размером 40–60 мкм, и при температуре 800–900 °С для порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Мо}$ – частицы с размером 60–80 мкм [5, 6, 15, 21].

3. В результате компьютерного моделирования процессов нагрева частиц порошков оксида алюминия, модифицированных молибденом и бором, в струе плазмы установлено, что при заданной мощности напыления наличие молибдена и бора на поверхности керамических частиц оказывает значительное влияние на кинетику нагрева, повышая температуру керамической сердцевины на 500–600 °С по сравнению с температурой частиц без модифицирующих элементов за счет поддержания более высокой температуры на ее поверхности до момента соударения с материалом основы, что обеспечивает формирование

покрытия из полностью расплавленных керамических частиц. Определены диапазоны размеров частиц порошков (60–80 мкм – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$; 40–60 мкм – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}$), обеспечивающие при нагреве в плазменной струе достижение минимально необходимых для формирования адгезионной связи значений температур в контакте с материалом основы, составляющих порядка 1574 °С для порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$ и 1433 °С для порошка $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}$. Описанные условия обеспечивают сохранение количества высокотвердой фазы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в покрытиях при плазменном напылении модифицированных порошков [7].

4. В результате экспериментальных исследований выявлено влияние режимов плазменного напыления (ток дуги и дистанция напыления) и количества модифицирующих добавок в порошках оксида алюминия, модифицированного молибденом и бором, на прочность сцепления покрытий; определены режимы, обеспечивающие получение наибольшей прочности сцепления с основой: $L = 80$ мм, $I = 420$ А – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}$; $L = 120$ мм, $I = 420$ А – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$ при содержании модифицирующих элементов в исходном порошке 15 % [1, 7, 8, 11].

5. В результате экспериментальных исследований влияния модифицирующих добавок на структуру и свойства покрытий (прочность сцепления, пористость, твердость), полученных плазменным напылением порошков оксида алюминия, модифицированных молибденом и бором установлено, что введение добавок оказывает положительное влияние на свойства покрытий: пористость покрытий снизилась в 2–2,2 раза, прочность сцепления увеличилась в 2,2–2,4 раза и составила порядка 26–27 МПа – для $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$, что объясняется образованием химической связи со стальной основой (Fe_3Mo_2), и 25–26 МПа – для $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}$, что может быть объяснено эффектом контактного эвтектического плавления подложки в переходной зоне с образованием борида железа Fe_3B [2, 8, 10, 12, 13, 14, 15, 18, 19, 21].

6. Экспериментально установлено влияние модифицирующих добавок на триботехнические характеристики покрытий для различных условий трения (наличие смазочного материала, скорость, удельная нагрузка). Наибольшую износостойкость в условиях трения без смазочного материала и трения со смазочным материалом показывают покрытия с содержанием молибдена 6–8 % и бора 8–10 %, что объясняется повышением содержания гексагональной фазы ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), а также образованием пленок оксидов MoO_3 и V_2O_3 на поверхностях трения, выступающих в роли твердого смазочного материала и снижающих коэффициент трения. Покрытия $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$ с содержанием молибдена 6–8 % проявляют наибольшую износостойкость при низких скоростях скольжения в паре трения и высоких удельных давлениях порядка 30–40 МПа. В свою очередь, при удельном давлении в паре трения порядка 10 МПа и скоростях более 10 м/с рекомендуется применять покрытия $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}$ с содержанием бора 8–10 %, что объясняется образованием и сохранением пленок вторичных структур на основе оксидов (MoO_3 и V_2O_3) в указанных диапазонах значений скоростей и удельных давлений в паре трения [3, 4, 9, 12, 13, 16, 17, 18, 20].

Рекомендации по промышленному использованию результатов

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана технологическая инструкция АТЮФ.25071.00001 нанесения керамических покрытий плазменным напылением модифицированных порошков Al_2O_3 –Mo и Al_2O_3 –B. Состав порошка защищен патентом Республики Беларусь № 21612.

Результаты исследований внедрены на ОАО «ГСКБ» по комплексу оборудования для микроклимата (Брест) для упрочнения детали «Шарнир» механизма открывания водонагревательного котла. Испытания показали, что время работы детали в узле повышается в 3–3,5 раза. Изготовлена опытная партия деталей в количестве 500 штук. Годовой экономический эффект составил 865 100 тыс. руб. (в ценах 2015 г.). Результаты исследований апробированы на предприятии ООО «Восточный Вектор Про» (Минск) для упрочнения деталей «Вал», являющихся осями счетчика расхода рабочей среды нефтедобывающего оборудования.

Основные положения диссертации внедрены в учебный процесс на кафедре «Технология машиностроения» БНТУ при чтении лекций по дисциплине «Теория и практика нанесения защитных покрытий».

Результаты исследований могут быть рекомендованы для использования на предприятиях машиностроительного профиля с целью защиты от износа поверхностей деталей, работающих в тяжелых условиях без достаточного количества смазочного материала.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК

1. Разработка технологических процессов получения оксидных покрытий с улучшенным комплексом свойств / М. А. Кардаполова, О. Г. Девойно, В. М. Константинов, О. К. Яцкевич // Вестник БрГТУ. Машиностроение. – 2006. – № 4 (40). – С. 31–35.
2. Формирование керамических покрытий из диффузионно-легированного оксида алюминия / О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова, А. И. Комаров, О. К. Яцкевич // Вестник БрГТУ. Машиностроение. – 2009. – № 4 (58). – С. 30–33.
3. The tribological studies of plasma-sprayed ceramic coatings / E. Feldshtein, A. Laber, O. Devojno, O. Yatskievich // Tribologia. – 2010. – № 2. – P. 23–34.
4. Исследование триботехнических свойств плазменных керамических покрытий на основе диффузионно-легированного оксида алюминия / О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова, О. К. Яцкевич, В. Л. Николаенко // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка. – 2013. – № 1. – С. 18–23.
5. Девойно, О. Г. Влияние технологических параметров термодиффузионной обработки и содержания легирующих элементов на свойства оксида алюминия / О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова, О. К. Яцкевич // Прогресивні технології і системи машинобудування. – Донецьк: ДоНТУ, 2016. – № 4 (55). – С. 86–94.

6. Яцкевич, О. К. Технология модифицирования порошковых материалов на основе оксида алюминия для плазменного напыления / О. К. Яцкевич, О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк, МСМ, 2018. – № 4 (63). – С.134–143.

Статьи в сборниках научных трудов, включенных в перечень ВАК

7. Яцкевич, О. К. Оптимизация температурно-временных параметров поведения модифицированных бором и молибденом частиц оксида алюминия в плазменной струе / О. К. Яцкевич, О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. Кн. 2 : Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки / редколлегия : С. А. Астапчик (гл. ред) [и др.]. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2016. – С. 91–97.

8. Девойно, О. Г. К вопросу о повышении прочности сцепления керамических покрытий / О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова, О. К. Яцкевич // Машиностроение: респ. межведомственный сб. науч. тр. Вып. 30 / глав. ред. В. К. Шелег. – Минск: БНТУ, 2017. – С. 44–48.

9. Яцкевич, О. К. Фрикционное взаимодействие керамических покрытий на основе оксида алюминия, модифицированного термодиффузионной обработкой, со сталью / О. К. Яцкевич, О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова // «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» : сб. науч. тр. : в 3 кн. Кн. 2 : Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки / редколлегия : А. В. Белый (гл. ред) [и др.]. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2018. – С. 261–267.

Статьи в других изданиях

10. Формирование защитных керамических покрытий на основе оксидной керамики, модифицированной химико-термической обработкой / О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова, О. К. Яцкевич, Н. И. Луцко // Машиностроение. – Минск, 2009. – Вып. 25. – С. 92–96.

Материалы конференций

11. Кардаполова, М. А. Повышение физико-механических и эксплуатационных характеристик покрытий на основе оксида алюминия легированием молибденом / М. А. Кардаполова, О. Г. Девойно, О. К. Яцкевич // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XIII Междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 11–16 сентября 2006 г. – Донецк, 2006. – Т.2. – С. 108–113.

12. Формирование защитных керамических покрытий на основе оксидной керамики, модифицированной химико-термической обработкой / О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова, В. М. Константинов, О. К. Яцкевич // Пленки и покрытия 2007 : материалы 8-й Междунар. науч.-техн. конф. – СПб., 2007. – С. 73–76.

13. Исследование влияния состава композиционного керамического материала, полученного методом диффузионного легирования, на свойства плазменных покрытий на его основе / О.Г. Девойно, М.А. Кардаполова, О.К. Яцкевич, А. Г. Василенко // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XVI Меж-

дунар. науч.-техн. конф. : в 4 т. – Донецк : ДонНТУ, 2010. – Т. 1. – С. 235–240.

14. Девойно, О. Г. Исследование влияния компонентов композиционного керамического материала, полученного методом диффузионного легирования, на параметры плазменного покрытия на его основе / О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова, О. К. Яцкевич // Инженерия поверхностного слоя деталей машин : сб. материалов II Междунар. науч.-техн. конф., 27–28 мая 2010 г. / редколлегия : Б. М. Хрусталеv, Ф. И. Пантелеенко, В. Ю. Блюменштейн. – Минск : БНТУ, 2010. – С. 191–192.

15. Создание композиционных покрытий из диффузионно-легированной порошковой керамики на основе оксида алюминия / О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова, О. К. Яцкевич, Н. И. Луцко, А. Г. Василенко // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XVIII Междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 12–17 сентября 2011 г. : в 4 т. – Донецк : ДонНТУ, 2011. – Т. 1. – С. 238–245.

16. Девойно, О. Г. Плазменные керамические покрытия на основе диффузионно-легированных порошков / О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова, О. К. Яцкевич // Инновации в машиностроении : сб. тр. Междунар. молод. конф., 27–29 августа 2012 г. / Юргинский технологический институт. – Томск : Изд-во Томского политехн. ун-та, 2012. – С. 103–106.

17. Влияние состава и структуры композиционной керамики на основе оксида алюминия на триботехнические характеристики при трении по стали в широком интервале давлений и скоростей / О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова, Н. И. Луцко, О. К. Яцкевич // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XX Междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 16–21 сентября 2013. – Донецк : ДОННТУ, 2013. – Т. 1. – С. 206–210.

18. Управление свойствами плазменных керамических покрытий модифицированием порошков на основе оксида алюминия / М. А. Кардаполова, О. К. Яцкевич, Д. Г. Девойно, В. М. Константинов // «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта : теория и практика» : материалы 17 Междунар. науч.-техн. конф. – СПб., 2015. – С. 176–181.

Тезисы докладов

19. Кардаполова, М. А. Получение керамических покрытий с улучшенным комплексом свойств / М. А. Кардаполова, О. К. Яцкевич // Новые материалы и технологии : порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия : материалы докл. 7 Междунар. науч.-техн. конф. 16–17 мая 2006, Институт порошковой металлургии. – Минск : 2006. – С. 276–277.

20. Яцкевич, О. К. Трибологические свойства легированных покрытий на основе оксида алюминия / О. К. Яцкевич, О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 14 Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : БНТУ, 2016. – Т. 1. – С. 451.

Патент

21. Порошковый материал для напыления защитного керамического покрытия и способ его получения: пат. ВУ 21612 / О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова, О. К. Яцкевич, В. Г. Щербakov. – Опубл. 28.02.2018.

РЭЗЮМЭ

Яцкевіч Вольга Канстанцінаўна

**Тэхналогія фарміравання зносастойкіх керамічных пакрыццяў
плазмавым напыленнем парашкоў аксіда алюмінію,
мадыфікаваных малібдэнам і борам**

Ключавыя словы: плазмавае напыленне, керамічныя пакрыцці, аксід алюмінію, мадыфікаваныя парашкі, трываласць счাপлення, зносаўстойлівасць.

Мэта працы: распрацоўка тэхналогіі фарміравання зносастойкіх керамічных пакрыццяў плазмавым напыленнем парашкоў аксіда алюмінію, мадыфікаваных малібдэнам ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$) і борам ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}$), якая забяспечвае павышэнне трываласці счাপлення пакрыцця з металічнай асновай і паляпшэнне трыбатэхнічных характарыстык.

Метады даследавання: метады кампутэрнага мадэлявання, статыстычнай апрацоўкі дадзеных; стандартныя метадыкі ацэнкі фізіка-механічных уласцівасцяў напыленых пакрыццяў, метады аптычнага, мікрантэнаспектральнага і рэнтгенаструктурнага аналізаў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: вызначаны механізм уплыву тэрмадыфузійнай апрацоўкі на марфалогію, фізічныя і тэхналагічныя ўласцівасці парашкоў аксіда алюмінія, мадыфікаваных малібдэнам і борам, што дазволіла вызначыць рэжымы, якія забяспечваюць атрыманне парашкоў с аптымальнымі памерамі з пункту гледжання працэса плазмавага напылення. Выкананыя ацэнкі ўмоў напылення з выкарыстаннем метаду кампутарнага мадэлявання дазволілі ўсталяваць уплыў мадыфікаваных элементаў на інтэнсіўнасць нагрэву часцінак у плазмавай бруі і механізм узнікнення адгезійнай сувязі расплаўленай часцінкі з матэрыялам дэталі. Эксперыментальна ўсталяваны ўплыў колькасці мадыфікуючых элементаў на трываласць счাপлення пакрыццяў $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$ і $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}$ з матэрыялам дэталі, якая павялічваецца ў 2,2-2,4 разы, а таксама на цвёрдасць, порыстасць. Даследаванне трыбатэхнічных характарыстык керамічных пакрыццяў дазволіла вызначыць саставы, якія забяспечылі атрыманне найвялікшай зносаўстойлівасці ў разнастайных умовах трэння.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: на падставе праведзеных даследаванняў створана тэхналагічная інструкцыя АТЮФ.25071.00001 нанясення керамічных пакрыццяў плазмавым напыленнем мадыфікаваных парашкоў $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$ і $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}$. Вынікі даследавання могуць выкарыстоўвацца пры ўмацаванні дэталі ў вузлоў трэння кацельнага, нафтаздабыўнага абсталявання.

Галіна выкарыстання: прамысловыя прадпрыемствы, якія займаюцца вырабам і абаронай ад зносу дэталі ў вузлоў трэння тэхналагічнага абсталявання.

РЕЗЮМЕ

Яцкевич Ольга Константиновна

Технология формирования износостойких керамических покрытий плазменным напылением порошков оксида алюминия, модифицированных молибденом и бором

Ключевые слова: плазменное напыление, керамические покрытия, оксид алюминия, модифицированные порошки, прочность сцепления, износостойкость.

Цель работы: разработка технологии формирования износостойких керамических покрытий плазменным напылением порошков оксида алюминия, модифицированных молибденом (Al_2O_3-Mo) и бором (Al_2O_3-B), обеспечивающей повышение прочности сцепления покрытий с металлической основой и улучшение триботехнических характеристик.

Методы исследования: методы компьютерного моделирования, статистической обработки данных; стандартные методики оценки физико-механических свойств напыленных покрытий; методы оптического, микрорентгеноспектрального и рентгеноструктурного анализов.

Полученные результаты и их новизна: установлен механизм влияния термодиффузионной обработки на морфологию, физические и технологические свойства порошков оксида алюминия, модифицированных молибденом и бором, что позволило определить режимы, обеспечивающие получение порошков с оптимальными размерами с точки зрения процесса плазменного напыления. Проведенные оценки условий напыления с использованием метода компьютерного моделирования позволили установить влияние модифицирующих элементов на интенсивность нагрева частиц в плазменной струе и механизм образования адгезионной связи расплавленной частицы с материалом детали. Экспериментально установлено влияние количества модифицирующих элементов на прочность сцепления покрытий Al_2O_3-Mo и Al_2O_3-B с основой, которая увеличивается в 2,2–2,4 раза, а также на твердость, пористость. Исследование триботехнических характеристик керамических покрытий, позволило определить составы, обеспечивающие получение наибольшей износостойкости в различных условиях трения.

Рекомендации по использованию: на основании проведенных исследований разработана технологическая инструкция АТЮФ.25071.00001 нанесения керамических покрытий плазменным напылением модифицированных порошков Al_2O_3-Mo и Al_2O_3-B . Результаты исследования могут быть использованы при упрочнении деталей узлов трения котельного, нефтедобывающего оборудования.

Область применения: промышленные предприятия, занимающиеся изготовлением и защитой от изнашивания деталей узлов трения технологического оборудования.

SUMMARY

Yatskevich Olga

Technology for forming wear resistant ceramic coatings by plasma spraying aluminum oxide powders, modified by molybdenum and boron

Key words: plasma spraying, ceramic coatings, aluminum oxide, the modified powders, bonding strength, wear resistance.

The aim of the work is to develop a technology for forming wear resistance ceramic coatings plasma-sprayed with aluminum oxide powders, modified by molybdenum ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$) and boron ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$), which provides increase in bonding strength of coatings with a metal base and improvement of tribotechnical characteristics.

Methods of research: computer modeling method, method of statistical data processing, standard techniques of assessing the physical and mechanical properties of the deposited coatings; optical methods, electron microprobe analysis and X-ray diffraction analysis

Obtained results and their novelty: the influence mechanism of thermal diffusion processing on morphology, physical and technological properties of modified aluminum oxide powders was established, that allowed to define the modes providing powders with optimum sizes in plasma spraying terms. The carried-out by computer modeling particle temperature allowed to establish influence of the modifying elements on the heating intensity of particles in spraying and on the adhesive mechanism between melted particle and detail material. Influence of modifying elements quantity on the hardness, porosity, bonding strength $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ and $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$ coatings which increased by 2,2-2,4 times was established. The research of tribotechnical characteristics of ceramic coatings allowed to define the compositions providing the greatest wear resistance in the different conditions of friction.

Recommended use: on the basis of the theoretical and experimental researches the technological instruction АТЮФ.25071.00001 for plasma spraying ceramic coatings $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ and $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$ was developed. Results of a research can be used for hardening details of frictional units of the boiler, oil-extracting equipment.

Scope of application: the industrial enterprises dealing with production and protection details of frictional units against wear.

Научное издание

**ЯЦКЕВИЧ
ОЛЬГА КОНСТАНТИНОВНА**

**ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ
КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ПЛАЗМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ
ПОРОШКОВ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ
МОЛИБДЕНОМ И БОРОМ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Подписано в печать 19.04.2019. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,09. Тираж 80. Заказ 254.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск