

## АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности 8D05301 – «Техническая физика»

**Мұқтановой Назерке**

**«Формирование структуры, фазового состава и свойств покрытий WC-Co-Cr при высокоскоростном газопламенном напылении»**

**Общая характеристика работы.** Диссертация посвящена разработке металлокерамических покрытий на основе карбида вольфрама с кобальт-хромовой связкой (WC-Co-Cr) с высокой стойкостью к износу и коррозии, а также исследованию закономерностей формирования их структуры, фазового состава и эксплуатационных свойств в зависимости от технологических режимов высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF). В работе представлены результаты исследования микроструктуры, фазового и элементного состава, механических, трибологических и коррозионных характеристик покрытий WC-Co-Cr, нанесенных на поверхности стали 30X13, применяемой для ответственных деталей шиберных задвижек. Проведены комплексные экспериментальные исследования износостойкости покрытий WC-Co-Cr, полученных методом высокоскоростного газопламенного напыления. В рамках диссертационной работы разработана технология получения износостойкого покрытия WC-Co-Cr для деталей шиберных задвижек, которая защищена патентом Республики Казахстан на полезную модель «Шиберная задвижка с покрытием» № 10138, опубликованным 31.01.2025 г.

**Цель работы:** Разработка металлокерамических покрытий на основе WC-Co-Cr с высокой стойкостью к износу, эрозии и коррозии, а также установление закономерностей формирования их структуры и свойств в зависимости от технологических режимов высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF) и характеристик исходного порошкового материала.

В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие **задачи:**

- установить закономерности нагрева и ускорения частиц порошка WC-Co-Cr различных фракций при HVOF-напылении с использованием CFD-моделирования и обосновать рациональный фракционный состав порошка;
- установить влияние фракционного состава и морфологии порошка на структурно-фазовое состояние покрытий WC-Co-Cr;
- выявить закономерности формирования структуры покрытия WC-Co-Cr в зависимости от дистанции напыления и расхода рабочих газов;
- определить влияние микроструктурных параметров на механические, трибологические и коррозионные характеристики покрытий WC-Co-Cr;
- провести комплексную оценку эксплуатационной стойкости покрытий WC-Co-Cr в условиях абразивного, гидроабразивного и эрозионного воздействия.

**Объект исследования** – покрытие WC-Co-Cr, полученное методом высокоскоростного газопламенного напыления.

**Предмет исследования** – структурно-фазовое состояние, механизмы формирования и разрушения покрытий WC-Co-Cr, а также их взаимосвязь с технологическими параметрами напыления и характеристиками исходного порошкового материала.

– **Методы исследования.** Работа выполнена с использованием комплекса современных экспериментальных и расчётных методов: сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионного анализа, рентгенофазового анализа, микротвердомерии (ГОСТ 9450-76), трибологических испытаний по схеме «шар-диск» (ASTM G99) испытаний на стокость к абразивному изнашиванию (ГОСТ 23.208-79), испытаний на стокость к гидроабразивному изнашиванию (ASTM G134-95), испытаний на адгезии методом отрыва (ASTM C633-01), испытаний на коррозии в солевом тумане (ГОСТ 9.308-85), электрохимических исследований на коррозии (ASTM G59-13), испытаний на эрозионную стойкость (ASTM G76-04) и CFD-моделирования динамики частиц в струе HVOF. Методологический подход основан на системном анализе взаимосвязи параметров технологического процесса, структурно-фазового состояния и эксплуатационных свойств покрытий.

При выполнении работы использовали ресурсы и оборудование научного центра «Защитные и функциональные покрытия» ВКТУ имени Д.Серикбаева, научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология» ВКУ имени С. Аманжолова, научных лабораторий ТОО «PlasmaScience» и Карагандинского университета имени академика Е.А. Букетова, а также Вроцлавского университета науки и технологий (г. Вроцлав, Польша).

#### **Научная новизна работы:**

- Впервые научно обоснованы рациональные режимы HVOF-напыления покрытий WC-Co-Cr на сталь 30X13, обеспечивающие формирование плотной структуры и повышение физико-механических и трибологических характеристик.

- Впервые установлены закономерности влияния температурно-скоростных характеристик частиц WC-Co-Cr на соотношение фаз WC/W<sub>2</sub>C и пористость покрытий.

- Выявлена взаимосвязь микроструктурных параметров, фазового состава и пористости покрытий WC-Co-Cr с механизмами абразивного, гидроабразивного, эрозионного и коррозионного разрушения.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

*1. На основе CFD-моделирования газодинамических и тепловых процессов в высокоскоростной струе при HVOF-напылении научно обоснован рациональный фракционный состав порошка WC-Co-Cr, обеспечивающий оптимальное сочетание скорости полета 800–900 м/с и температуры нагрева около 1400°C, при котором достигаются повышение пластичности*

*металлической связи, интенсивная деформация частиц при ударе и формирование плотного покрытия без перегрева.*

*2. Установлены закономерности влияния дистанции HVOF-напыления, расхода рабочих газов и фракционного состава порошка на фазовый состав, пористость и физико-механические свойства покрытий WC-Co-Cr.*

*3. Лабораторными и стендовыми испытаниями подтверждено, что нанесение покрытия WC-Co-Cr на сталь 30X13 методом HVOF при дистанции 300 мм, расходе кислорода 170 л/мин и фракции порошка 21-35 мкм обеспечивает существенное повышение стойкости к абразивному изнашиванию в 9 раз, гидроабразивному изнашиванию в 5 раз, эрозионной стойкости в 1,4 раза и коррозионной стойкости в 5,2 раза.*

**Основные результаты работы.** Проведенные исследования показали, что технологические параметры HVOF-напыления оказывают существенное влияние на свойства покрытий WC-Co-Cr. CFD-моделирование продемонстрировало, что температура, давление и скорость газового потока играют важную роль в формировании покрытия. В ходе исследования установлено, что порошки с размером частиц 21-35 мкм обеспечивают оптимальное соотношение температуры и скорости, а наиболее эффективным режимом является дистанция напыления 300 мм. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с данными моделирования, что подтверждает надежность использованного метода. Также выявлено, что расход кислорода, гранулометрический состав порошка и дистанция напыления существенно влияют на структуру, фазовый состав, микротвердость и износостойкость покрытий. При оптимальных параметрах покрытия характеризуются высокой твердостью, низкой пористостью и высокой адгезионной прочностью. Полученные результаты показали, что покрытия WC-Co-Cr значительно повышают коррозионную, эрозионную, абразивную и гидроабразивную стойкость стали 30X13. Данные результаты создают научную основу для разработки эффективных технологий защиты деталей, работающих в условиях интенсивного износа и агрессивных сред.

**Практическое значение научных результатов.** Полученные результаты вносят вклад в развитие физико-металлургических представлений о процессах формирования газотермических керметных покрытий и могут быть использованы при разработке теоретических моделей структурообразования в условиях высокоскоростного напыления. Разработана научно-обоснованная технология получения покрытий WC-Co-Cr, обеспечивающая существенное повышение трибологических и коррозионных характеристик стали 30X13, широко применяемой для изготовления деталей шибберных задвижек. Разработанная технология является экологически более безопасной альтернативой гальваническому хромированию и может быть внедрена на предприятиях по производству трубопроводной арматуры. Практическая

значимость подтверждена патентом Республики Казахстан на полезную модель («Шибберная задвижка с покрытием» № 10138, опуб. 31.01.2025 г.).

**Связь работы с научно-исследовательскими проектами.** Диссертация на тему «Формирование структуры, фазового состава и свойств покрытий WC-Co-Cr при высокоскоростном газопламенном напылении» соответствует приоритетному направлению развития науки «Энергетика и машиностроение» и выполнена в рамках проекта, финансируемого Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан:

AP14870977 «Повышение эксплуатационных характеристик деталей шибберных задвижек, используемых в нефтедобывающей промышленности», грантовое финансирование научных и (или) научно-технических проектов на 2022-2024 гг.

BR24992854 «Разработка и реализация конкурентоспособных научно-обоснованных технологий для обеспечения устойчивого развития горно-металлургической отрасли Восточно-Казахстанской области», 2024-2026 гг.

**Личный вклад автора.** Личный вклад автора заключается в проведении экспериментально-исследовательских работ, анализе полученных результатов, представленных в диссертации, а также в написании научных статей. Определение цели и задач диссертационной работы, формулирование основных выводов осуществлялось совместно с научными руководителями.

**Степень обоснованности и достоверности результатов** обеспечивается использованием современных методов изучения структуры, химического и фазового состава, механических и трибологических испытаний, определения прочности сцепления покрытий. Результаты диссертации не противоречат известным научным представлениям и соответствуют изученным материалам.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертации доложены и обсуждены на следующих научных мероприятиях: Международной конференции «XL Jesienna Szkola Tribologiczna», г. Буковина, Польша, 13-16 сентября 2022 г.; Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и образования в условиях современных вызовов», посвящённой 70-летию ВКУ имени С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Казахстан, 16-17 сентября 2022 г.; Международной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики», г. Ташкент, Узбекистан, 19-21 октября 2023 г.; 10-й Международной научно-технической конференции «Творчество молодых — инновационному развитию Казахстана», посвящённой 125-летию Каныша Сатпаева, г. Усть-Каменогорск, 11-12 апреля 2024 г., а также обсуждались на научных семинарах факультета базовой инженерной подготовки Восточно-Казахстанского технического университета имени Д. Серикбаева и научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология» Восточно-Казахстанского университета имени Сарсена Аманжолова.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 12 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 4 статьи в журналах, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования МНиВО Республики Казахстан, 4 работы в материалах республиканских и международных конференций и других научных изданиях, а также 1 патент Республики Казахстан на полезную модель.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников, включающего 137 наименований и 1 приложения. Общий объем диссертации составляет 140 страниц, включая 73 рисунков и 20 таблиц.