

## АННОТАЦИЯ

диссертации Маулет Меруерт, представленной на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе «8D05301 – Физика» на тему: «Закономерности формирования структуры и свойств детонационных покрытий на основе Ni-Cr-Al»

**Общая характеристика исследования.** Диссертационная работа посвящена исследованию закономерностей формирования структуры и свойств детонационных покрытий в системе Ni-Cr-Al. При изменении объёма заполнения детонационного ствола взрывчатым газом на 25 %, 30 %, 40 % и 50 % были исследованы морфология и элементный состав покрытия NiCr-Al, в результате чего был установлен метод получения градиентного покрытия на основе NiCr-Al с градиентным распределением элементов с использованием детонационного метода. Были проведены сравнительные исследования механико-трибологических и жаростойких свойств однородных и градиентных детонационных покрытий NiCr-Al с различным распределением элементов. Результаты, полученные в диссертационной работе, имеют важное значение для разработки защитных покрытий на основе NiCr-Al, предназначенных для деталей, работающих в условиях высокотемпературного окисления, агрессивной коррозионной среды и интенсивного износа.

**Актуальность темы исследования.** Нанесение защитных покрытий на поверхности деталей, работающих при высоких температурах, в настоящее время широко распространено. Покрытие NiCr-Al широко используется в энергетике и для защиты лопаток газовых турбин в качестве жаростойкого покрытия. Однако, для формирования на поверхности покрытия достаточного количества оксидных защитных слоёв крайне важно совершенствование методов его нанесения. Среди технологий нанесения защитных покрытий одной из перспективных является технология детонационного напыления. Данная технология, используя энергию взрывчатых газов, позволяет получать покрытия с низкой пористостью и высокой адгезионной прочностью. Однако направление получения жаростойких покрытий на основе NiCr-Al с использованием технологии детонационного напыления изучено недостаточно полно. В связи с этим тема диссертационной работы посвящена исследованию структуры и свойств детонационных покрытий на основе NiCr-Al, при этом актуальной задачей является стабилизация содержания алюминия в составе покрытия.

**Цель работы:** Исследование закономерностей формирования структуры и свойств детонационных покрытий на основе NiCr-Al и разработка метода получения градиентных покрытий на основе NiCr-Al с высокими механическими и коррозионными свойствами с использованием детонационного метода.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие **задачи:**

- исследовать формирование структуры покрытий на основе NiCr-Al при детонационном напылении;
- разработать метод получения градиентного покрытия с распределением элементов на основе NiCr-Al методом детонационного напыления;
- провести сравнительное исследование механико-трибологических и жаростойких свойств однородных и градиентных покрытий на основе NiCr-Al, полученных методом детонационного напыления с распределением элементов.

**Объект исследования** – покрытия на основе NiCr-Al, полученные методом детонационного напыления.

**Предмет исследования** – структурно-фазовое состояние, а также механико-трибологические, коррозионные и жаростойкие свойства покрытия NiCr-Al, полученного методом детонационного напыления.

**Методы исследования.** Для выполнения поставленных задач в работе были использованы следующие современные экспериментальные методы для исследования состава, структуры и свойств покрытий: сканирующая электронная микроскопия; рентгеновский фазовый анализ; методы микро- и наноиндентирования; определение адгезии методом отрыва; трибологические испытания по схемам «шар-диск» и «линейное возвратно-поступательное изнашивание».

В ходе выполнения работы были использованы исследовательские установки Научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология» Восточно-Казахстанского университета имени Сарсена Аманжолова, Карагандинского университета имени академика Е.А. Букетова, Вроцлавского университета науки и технологий (г. Вроцлав, Польша) и Университета АГН (г. Краков, Польша).

**Научная новизна исследования:**

– Впервые установлены закономерности формирования структуры покрытий на основе NiCr-Al в зависимости от изменения объёма заполнения детонационного ствола взрывчатый газом при детонационном напылении. В результате проведённых комплексных исследований разработан способ получения градиентного покрытия с распределением элементов на основе NiCr-Al, обладающего высокими механическими и коррозионными свойствами, методом детонационного напыления. Особенность данного способа заключается в получении градиентного покрытия на основе NiCr-Al на однодозаторной детонационной установке за счёт изменения объёма заполнения детонационного ствола кислородно-ацетиленовой смесью, и данный метод защищён патентом Республики Казахстан на полезную модель «Способ получения функционально-градиентного покрытия» (№8922, опубликован 07.03.2024);

– Впервые проведены комплексные сравнительные исследования механико-трибологических и жаростойких свойств градиентных и однородных покрытий NiCr-Al(20%), полученных методом детонационного напыления с распределением элементов.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. *Закономерности формирования покрытий на основе NiCr-Al методом детонационного напыления.* Фазовый состав покрытия NiCr-Al(20%) при детонационном напылении может гибко регулироваться за счёт изменения объёма взрывчатой газовой смеси. При заполнении детонационного ствола на 25 % и 30 % взрывчатой газовой смесью кислорода и ацетилена с соотношением  $O_2/C_2H_2 = 1,856$  формируется покрытие, состоящее из фаз CrNi<sub>2</sub>, Al и NiAl. При увеличении энергии взрывного заряда до 40 % и 50 % образуется покрытие, содержащее только фазу CrNi<sub>2</sub>;

2. *Метод получения градиентного покрытия посредством детонационного напыления.* Градиентная структура распределения элементов в покрытии NiCr-Al(20%) по сравнению с однородным покрытием обеспечивает увеличение микротвёрдости и адгезионной прочности примерно на 30 %, а износостойкости - в два раза. Постепенное снижение объёма заполнения детонационного ствола кислородно-ацетиленовой смесью ( $O_2/C_2H_2 = 1,856$ ) с 50 % до 25 % обеспечивает формирование градиентной структуры покрытия NiCr-Al(20%), при которой содержание Al постепенно увеличивается от подложки к поверхности покрытия, тогда как содержание Ni и Cr, соответственно, уменьшается;

3. *Результаты исследования жаростойкости градиентного покрытия NiCr-Al(20%) с градиентным распределением элементов.* Высокотемпературная стойкость градиентных покрытий NiCr-Al(20%) значительно превышает таковую у покрытий с однородной структурой, что объясняется лучшей согласованностью коэффициентов термического расширения между покрытием и подложкой, а также подавлением внутренних процессов окисления. Результаты испытаний покрытия NiCr-Al(20%) на высокотемпературное окисление в лабораторных и промышленных условиях показали, что в градиентных покрытиях за счёт сохранения Al в поверхностных слоях формируется защитная оксидная плёнка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Результаты высокотемпературных трибологических

испытаний выявили, что износостойкость градиентного покрытия примерно в 2,5 раза выше по сравнению с однородным композиционным покрытием.

**Практическая значимость.** Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы для разработки защитных покрытий, устойчивых к окислению и интенсивному износу в условиях высоких температур и агрессивной коррозионной среды, с целью продления срока службы оборудования в области энергетического машиностроения.

**Связь работы с научно-исследовательскими проектами.** Диссертационная работа выполнена в рамках приоритетного направления развития науки «Энергия, передовые материалы и транспорт» и реализована на основе следующих грантовых проектов и целевой программы, финансируемых Комитетом науки МНВО РК:

– AP08957765 «Разработка функционально-градиентных покрытий на основе Ni-Cr-Al для защиты от коррозии высокотемпературных элементов теплоэнергетического оборудования», грантовое финансирование на 2020-2021 годы;

– AP22688426 «Повышение защитных свойств детонационных покрытий на основе NiCrAl», грантовое финансирование молодых учёных по проекту «Жас ғалым» на 2024-2026 годы;

– BR24992876 «Разработка и апробация технологий обработки поверхности и получения композиционных защитных покрытий для повышения эксплуатационных свойств инструмента, деталей машин и оборудования», программно-целевое финансирование на 2024-2026 годы.

**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.

**Обоснованность и степень достоверности результатов.** В диссертационной работе использованы современные методы исследования структурно-фазового состояния, механико-трибологических и жаростойких свойств покрытий. Результаты исследований, представленные в диссертации, не противоречат известным научным представлениям и данным.

**Апробация научных трудов.** Основные результаты диссертации были представлены и обсуждены на следующих научных мероприятиях: 2020 IEEE 10th International Conference on «Nanomaterials: Applications & Properties», г. Сумы, Украина, 9-13 ноября 2020 г.; Международная научно-техническая молодежная конференция «Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения», г. Томск, Россия, 20-24 ноября 2023 г.; Международная научно-практическая конференция «Интеграция энергетики и машиностроения: инновационные технологии и практики», г. Алматы, Казахстан, 24 ноября 2023 г.; Материалы Международной практической интернет-конференции «Challenges of Science», г. Алматы, Казахстан, 22 ноября 2023 г.; а также на научных семинарах Научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология» Восточно-Казахстанского университета имени Сарсена Аманжолова и научно-производственной компании ТОО «PlasmaScience».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 18 работ, в том числе: 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus; 7 статей в журналах, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования МНВО Республики Казахстан; 8 работ в материалах международных конференций; 1 патент на полезную модель Республики Казахстан.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованных источников из 138 наименований и 2 приложений. Общий объём диссертации составляет 108 страниц, включая 62 рисунков и 10 таблиц.