

АННОТАЦИЯ

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

Кәкімжанова Дәуіра Нұржанұлы

**«Влияние импульсно-плазменной обработки на структуру и свойства
детонационных покрытий»**

Общая характеристика работы. Диссертация посвящена изучению влияния импульсно-плазменной обработки на структуру и свойства детонационных покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ и $\text{Fe-CrB}_2\text{-TiB}_2$. Рассмотрены изменения фазового состава, структуры, твердости, шероховатости, адгезионной прочности, износостойкости, трибологических и коррозионных свойств покрытий после импульсной плазменной обработки. Выявлена взаимосвязь между структурой и свойствами покрытий, зависящих от режима обработки. В результате разработан оптимальный технологический режим модификации поверхности детонационных покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ и $\text{Fe-CrB}_2\text{-TiB}_2$ импульсно-плазменной обработкой. Установлено, что под воздействием импульсно-плазменной обработки изменяется микроструктура детонационных покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ и $\text{Fe-TiB}_2\text{-CrB}_2$, повышая их твердость, износостойкость и коррозионную стойкость за счет снижения пористости и шероховатости поверхности.

Актуальность темы. В современных условиях развития машиностроительной, металлургической, энергетической, горнодобывающей и нефтегазовой отраслей возрастает актуальность задачи повышения эксплуатационных свойств деталей машин, работающих в условиях интенсивного износа. В большинстве случаев разрушение деталей машины начинается с поверхностного слоя, поскольку поверхностный слой сначала принимает на себя влияние внешних механических, тепловых и химических факторов. В этой связи разработка и совершенствование технологий, обеспечивающих формирование покрытий с высокими функциональными характеристиками, является одним из приоритетных направлений современной обработки поверхности.

Среди эффективных методов повышения эксплуатационных свойств деталей особое место занимает метод детонационного напыления получения покрытий. Особый интерес представляют детонационные покрытия на основе карбидных и боридных систем. В частности, покрытия $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ и $\text{Fe-CrB}_2\text{-TiB}_2$ отличаются высокой эффективностью и защитными свойствами при защите поверхностей стальных деталей, работающих в условиях большой нагрузки. Покрытия на основе системы $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ нашли широкое применение в результате оптимального сочетания свойств высокой твердости, термостойкости, коррозионной стойкости и износостойкости. В свою очередь, боридные покрытия на основе $\text{Fe-CrB}_2\text{-TiB}_2$ представляют значительный интерес как перспективные композитные материалы, обеспечивающие высокую твердость и высокую устойчивость к абразивному износу. Однако, несмотря на преимущества детонационного распыления, полученные

покрытия часто характеризуются определенной структурной неоднородностью, наличием пористости и микродефектов.

В связи с этим важной научной и практической задачей является разработка эффективных методов последующей модификации детонационных покрытий, направленных на улучшение их структуры и повышение эксплуатационных характеристик. Одним из наиболее перспективных направлений в этой области являются комбинированные методы обработки, основанные на воздействии концентрированных энергетических потоков. К ним относятся лазерные, электронно-лучевые, импульсно-плазменные и другие виды обработки, позволяющие целенаправленно изменять структурно-фазовое состояние поверхностных слоев. Благодаря локальному высокоэнергетическому воздействию обеспечивается уплотнение покрытия, уменьшение пористости, частичное плавление дефектов, перераспределение фаз и формирование более совершенной структуры. Среди таких методов особое место занимает импульсно-плазменная обработка. Её суть заключается в воздействии на поверхность материала кратковременными высокоэнергетическими плазменными импульсами, которые вызывают быстрое нагревание и интенсивное охлаждение поверхности. Кроме того, в процессе обработки в структуре покрытия могут происходить крупномасштабные физико-химические процессы, такие как фазовые превращения, перераспределение легирующих элементов, изменение морфологии структуры, уменьшение пористости, устранение микродефектов и формирование упрочненного поверхностного слоя. Благодаря этим особенностям импульсно-плазменная обработка рассматривается как один из эффективных способов повышения твердости, износостойкости, коррозионной стойкости и общей прочности детонационных покрытий.

Тем не менее, многие аспекты влияния импульсно-плазменной обработки на структуру и свойства детонационных покрытий на основе карбидных и боридных систем до сих пор до конца не выяснены. В частности, необходимо более глубокое понимание особенностей структурных изменений и свойств покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ и $\text{Fe-CrV}_2\text{-TiV}_2$ после импульсно-плазменной обработки. Недостаточное изучение этих проблем препятствует оптимизации режимов обработки на научной основе, ограничивая практическое применение этой технологии для упрочнения различных деталей машин.

Таким образом, изучение влияния импульсно-плазменной обработки на структуру, фазовый состав и свойства детонационных покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ и $\text{Fe-CrV}_2\text{-TiV}_2$ является актуальной научной задачей, которая имеет важное значение как для разработки теоретических представлений о процессах модификации карбидных и боридных покрытий, так и для разработки эффективных технологических решений для повышения эксплуатационной надежности деталей.

Цель работы: определить закономерности влияния импульсно-плазменной обработки на структурно-фазовое состояние и физико-механические свойства детонационных покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ и $\text{Fe-CrV}_2\text{-TiV}_2$.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие задачи:

- изучить влияние режимов импульсно-плазменной обработки детонационных покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ и $\text{Fe-CrB}_2\text{-TiB}_2$ на структурно-фазовое состояние, морфологию поверхности и уровень дефектности;
- определение особенностей изменения физико-механических свойств покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ и $\text{Fe-CrB}_2\text{-TiB}_2$ в зависимости от режимов импульсно-плазменной обработки;
- оценка влияния импульсно-плазменной обработки на трибологические и коррозионные характеристики покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ и $\text{Fe-CrB}_2\text{-TiB}_2$;
- определение основных механизмов упрочнения детонационных покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ и $\text{Fe-CrB}_2\text{-TiB}_2$ при импульсно-плазменной обработке.

Объект исследования: детонационные покрытия $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, $\text{Fe-CrB}_2\text{-TiB}_2$.

Предмет исследования: влияние импульсно-плазменной обработки на структуру и свойства детонационных покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, $\text{Fe-CrB}_2\text{-TiB}_2$.

Методы исследования. Для изучения структурно-фазовых состояний детонационных покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, $\text{Fe-CrB}_2\text{-TiB}_2$ использовались следующие методы: рентгенофазный анализ, сканирующая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, профилометрия. Для исследования свойств покрытий применялись следующие методы: метод наноиндентирования определения твердости; трибологическое испытание по схеме "шар-диск" и "возвратно-поступательный"; испытание на абразивный износ по схеме «вращающийся ролик – плоская поверхность» согласно ГОСТ 23.208 - 79; скретч-тест, метод определения прочности сцепления покрытий; Метод определения пористости в соответствии со стандартом ASTM E2109; электрохимический метод исследования коррозионной стойкости.

В ходе выполнения работ использованы ресурсы и оборудование следующих научно-исследовательских центров: научный центр "Защитные и функциональные покрытия" и центр превосходства «VERITAS» Восточно-Казахстанского технического университета им. Даулета Серикбаева, научно-производственная компания ТОО "PlasmaScience", научно-исследовательский центр "Инженерия поверхности и трибология" Восточно-Казахстанского университета им. Сарсена Аманжолова, Вроцлавский университет науки и технологий (г. Вроцлав, Польша) и Национальная академия наук Украины Е. О. Институт электросварки им. Патона (г. Киев, Украина).

Научная новизна исследовательской работы:

- впервые исследовано влияние импульсной плазменной обработки на структурно-фазовое состояние, физико-механические и трибологические свойства детонационных покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ и $\text{Fe-CrB}_2\text{-TiB}_2$;
- разработан комбинированный способ получения износостойких покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ и $\text{Fe-CrB}_2\text{-TiB}_2$ на основе детонационного напыления и импульсно-плазменной обработки.

Основные положения выносимые на защиту:

1) Разработан комбинированный способ получения покрытия, сочетающий детонационное напыление и импульсно-плазменную обработку, улучшающий физико-механические свойства покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ и $\text{Fe-CrB}_2\text{-TiB}_2$.

2) После импульсно-плазменной обработки интенсивность износа и коэффициент трения детонационных покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ и $\text{Fe-CrB}_2\text{-TiB}_2$ уменьшаются, а сопротивление контактному разрушению увеличивается.

3) Выявлены особенности структурного превращения покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ и $\text{Fe-CrB}_2\text{-TiB}_2$ под воздействием импульсно-плазменной обработки и основные механизмы их упрочнения.

Основные результаты работы. Установлено, что импульсно-плазменная обработка оказывает существенное влияние на структурно-фазовое состояние, морфологию поверхности и уровень дефектности детонационных покрытий. Показано, что импульсно-плазменная обработка улучшает физико-механические характеристики покрытий. После импульсно-плазменной обработки выявлено положительное влияние на трибологические и коррозионные свойства покрытий. После обработки коэффициент трения снижается, уменьшаются глубина и объём износа, а также повышается стойкость к абразивному и ударно-абразивному изнашиванию. Установлено, что улучшение свойств покрытий после импульсно-плазменной обработки связано с совокупностью структурных, фазовых и дефектных изменений, происходящих в поверхностном слое.

Практическая значимость. Практическая значимость работы заключается в том, что разработан научно обоснованный подход к повышению свойств детонационных покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ и $\text{Fe-CrB}_2\text{-TiB}_2$ с применением импульсно-плазменной обработки. Полученные результаты позволяют предложить рациональный технологический режим обработки, обеспечивающий снижение пористости покрытия, повышение твердости и износостойкости защитных слоев. Разработанная технология представляет практический интерес для укрепления деталей энергетического, металлургического и горного оборудования, где требуется комплексное повышение твердости, износостойкости и коррозионной стойкости.

Связь работы с научно-исследовательскими проектами. Диссертация выполнена в рамках программно-целевого финансирования BR24992854 "Разработка и реализация конкурентоспособных научно-обоснованных технологий для обеспечения устойчивого развития горно-металлургической отрасли Восточно-Казахстанской области" (2024-2026 гг.), финансируемой Комитетом науки МНВО РК в соответствии с приоритетным направлением развития науки "Передовое производство, цифровые и космические технологии".

Личный вклад автора. Личный вклад автора заключается в проведении экспериментов, исследовании, анализе полученных результатов и написании научных статей по теме диссертации. Постановка задач, основные выводы

диссертационной работы проводились совместно с научными консультантами.

Степень обоснованности и достоверности результатов. Степень обоснованности и достоверности результатов позволяет сделать результаты научно обоснованными и достоверными при комплексном анализе структурного, элементного и фазового состава, а также применении стандартизированных методов исследования при проведении исследования профиля поверхности, механических и трибологических испытаний, анализе больших объемов экспериментальных данных и проверке их повторяемости.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертации были изложены и обсуждены на следующих международных научных конференциях: XL конференция Осенней школы трибологии 2022 года (Польша, 2022 год); XV Международная научная конференция "Физика твердого тела" (г. Астана, Казахстан, 8-10 декабря 2022 года); IEEE 13th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2023) (Словакия, 10-15 сентября 2023 г.); 2024 IEEE 14th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2024) (г. Рига, Латвия, сентябрь 2024 г.); Международная конференция "Materials Science and Composite Engineering" (г. Стамбул, Турция, 25-26 декабря 2025 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 3 статьи в научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 2 статьи в журналах, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования МНВО Республики Казахстан, 3 работы в материалах республиканских и международных конференций и 1 патент на изобретение РК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, 150 списков использованной литературы и 1 приложения. Общий объем диссертации составляет 116 страниц, из них 60 рисунков и 8 таблиц.