

## АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности  
8D05301 – Физика

Жилкашиновой Асель Михайловны

«Исследование структурно-фазового состояния и свойств композиционного  
покрытия Cr-Al-Co-Y»

Диссертационная работа посвящена исследованию структурно-фазового состояния и свойств композиционного покрытия Cr-Al-Co-Y, полученного на основе разработанного способа магнетронного нанесения. В работе установлено влияние термической обработки на структурно-фазовое состояние и свойства композиционных покрытий Cr-Al-Co-Y.

Актуальность темы исследования. Как известно, одной из актуальных проблем физики конденсированного состояния и ее прикладных направлений является разработка технологии повышения прочностных и эксплуатационных свойств материалов покрытий ответственных деталей энергоустановок. Большое значение приобретают разработки новых способов воздействий на структуру и свойства покрытий, комплексное использование уже имеющихся разработок, оптимальное сочетание которых может создавать новые возможности для направленного воздействия на структуру и свойства получаемых покрытий. Нанесение защитных покрытий способно обеспечить повышение долговечности деталей без значительного увеличения их стоимости.

Методы исследования состояний и свойств покрытий достаточно широко освещены в научной литературе. Наряду с большим количеством публикаций, посвященных оригинальным исследованиям, имеются обзоры работ по этой тематике, авторские монографии, учебники и справочники.

Однако вышеназванные исследования, в основном, основывались на способах нанесения покрытий, при этом исследования в части структурно-фазового состояния и взаимосвязи между структурой и свойствами покрытия исследовались, на наш взгляд, не в полном объеме.

Вместе с тем, исследования композиционных покрытий представляют большой интерес с научной точки зрения. В них возможны эффекты, отсутствующие у других материалов. Микроструктура пленки может существенно отличаться от структуры объемного материала такого же состава, а свойства тонких пленок в значительной степени определяются их морфологией. Структурные дефекты в массивных материалах, не оказывающие существенного влияния на свойства, в тонких пленках могут кардинально влиять на их поведение. Шероховатость поверхности практически не влияет на характеристики массивных материалов, в то время как для пленочных материалов она может являться фактором, определяющим многие параметры. Поэтому при исследовании тонкопленочных материалов возможно открытие новых явлений и закономерностей, которые могут стать основой создания принципиально новых технологий и устройств.

При этом анализ показал актуальность исследования структурно-фазового состояния и свойств композиционных покрытий, так как в настоящее время в

условиях ограниченности материальных средств в промышленном комплексе особое значение приобретают технологии, увеличивающие долговечность (ресурс) деталей и узлов машин.

Несмотря на возрастающий поток публикаций по технологии нанесения и свойствам композиционных покрытий, многие вопросы процесса их формирования остаются в настоящий момент еще открытыми.

Актуальность темы исследования также обоснована повышенным интересом специалистов-материаловедов к способам модификации поверхности материалов – нанесением покрытий из различных материалов с заданной структурой и физико-механическими и химическими свойствами. При помощи таких покрытий можно существенным образом изменить механические, магнитные, тепловые и иные свойства исходного материала, получая изделия с требуемыми свойствами (например, антикоррозионными, износостойкими и др.).

Как известно, высокие значения эксплуатационных свойств различных материалов достигаются благодаря изменениям широкого ряда структурных характеристик материалов: типа, количества и размеров фаз; плотности, характера и распределения дефектов кристаллического строения и многих других факторов. Поэтому необходимость установления зависимости между свойствами любого материала и его структурой не вызывает сомнения. В тоже время для полноты понимания того, как влияет изменение различных технологических параметров любого из процессов модифицирования поверхностных слоев изделий на структуру и, соответственно, эксплуатационные характеристики, необходим комплексный исследовательский подход, который позволил бы получить всю полноту данных о структурно-фазовом состоянии исследуемых материалов. Это в дальнейшем дает возможность, применяя классические зависимости, оценить уровень важнейших механических характеристик материалов (прочность, пластичность, трещиностойкость и др.), а также структурные факторы, дающие максимальный вклад в эти свойства. Полученные результаты, в свою очередь, позволят предложить рекомендации по усовершенствованию технологий инженерии поверхности.

Таким образом, тематика диссертационной работы обоснована и направлена на исследование структурно-фазового состояния и свойств композиционного покрытия Cr-Al-Co-Y.

Цель работы - исследовать структурно-фазовое состояние и свойства композиционного покрытия Cr-Al-Co-Y, полученного на основе разработанного способа магнетронного нанесения.

Для достижения поставленной в работе цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) разработать магнетронный способ нанесения композиционного покрытия Cr-Al-Co-Y;
- 2) исследовать структурно-фазовые состояния и свойства композиционного покрытия Cr-Al-Co-Y;

3) установить влияние термической обработки на структурно-фазовые состояния и свойства композиционного покрытия Cr-Al-Co-Y.

Предмет исследования:

Композиционное покрытие Cr-Al-Co-Y, полученное на основе разработанного магнетронного способа нанесения.

Объект исследования:

Структурно-фазовые состояния и свойства композиционного покрытия Cr-Al-Co-Y.

Методы исследования:

Классические методы исследования: оптическая, электронная просвечивающая и растровая микроскопия, рентгеноструктурный анализ. Также были использованы механические испытания, термические методы обработки поверхности.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые:

- разработан и изучен магнетронный способ нанесения многослойных композиционных покрытий Cr-Al-Co-Y с управляемой концентрацией составляющих элементов. Определены оптимальные режимы нанесения композиционных покрытий;

- определены закономерности структурно-фазовых состояний композиционного покрытия Cr-Al-Co-Y;

- установлено влияние термической обработки на структурно-фазовые состояния и свойства композиционного покрытия Cr-Al-Co-Y.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Магнетронный способ нанесения композиционного покрытия Cr-Al-Co-Y

2. Результаты, характеризующие структурно-фазовое состояние и свойства композиционного покрытия Cr-Al-Co-Y

3. Закономерности изменения структурно-фазового состояния и свойств композиционного покрытия Cr-Al-Co-Y в зависимости от температуры

Научная и практическая значимость работы:

Полученные результаты расчетно-экспериментальных исследований дают новые, более глубокие представления о процессах формирования композиционных покрытий, полученных методом магнетронного распыления. Разработанный способ нанесения износостойкого покрытия защищен патентами на изобретения РК. Практическая значимость диссертационной работы подтверждена актом внедрения в производство.

Областью исследований полученных результатов являются металлургические предприятия, занимающиеся вопросами создания высокопрочных металлических изделий, созданием инновационных технологий поверхностной обработки материалов.

Личный вклад автора:

Личный вклад автора состоит в постановке задач исследования, анализе литературных данных, участии в проведении электронно-микроскопических, металлографических и рентгеноструктурных исследований композиционных покрытий, статистической обработке. Анализ полученных результатов и

формулировка основных выводов проведены совместно с научными консультантами. Экспериментальные результаты получены лично автором в соавторстве с сотрудниками ФГА ОУВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет (г. Томск, РФ), Центр коллективного пользования приборами и оборудованием «Высокие технологии и диагностика наносистем» ФГА ОУВО «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (г.Новосибирск, РФ), Национальной научной лаборатории коллективного пользования ВКУ им. С. Аманжолова и инженерного профиля ВКТУ им. Д. Серикбаева на основе договоров.

Связь темы с научно-исследовательскими программами:

Основная работа по содержанию настоящей диссертации началась с участием автора в разработке г/б проекта МОН РК № 306/2020 (договор № 113 от 01 июня 2020 года) на тему: «Создание композиционных покрытий для повышения эксплуатационных свойств ответственных узлов промышленного оборудования» (2020–2022 годы)».

Степень обоснованности и достоверности результатов, полученных в работе, обеспечивается:

Изучением и сопоставлением с полученными ранее экспериментальными результатами известных ученых СНГ и дальнего зарубежья с применением «прямых», хорошо апробированных экспериментальных методов исследования, трактовкой результатов и расшифровкой дифракционных картин. Полученные результаты не противоречат основным положениям физики конденсированных сред. Фазовые и структурные превращения, протекающие в композиционном покрытии Cr-Al-Co-Y в результате термической обработки объясняются с позиции известных закономерностей метастабильных фазовых превращений.

Источниками исследования являются основные экспериментальные и теоретические положения современной физики конденсированного состояния, физики металлов и сплавов, экспериментальные результаты оригинальных научных работ последних лет, приведенные в списке использованных источников.

Апробация результатов работы:

Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на международных конференциях:

1. “23<sup>rd</sup> International Conference on Wear of Materials», Канада, 26-29 апреля 2020г.;

2. International online conference «Advanced manufacturing materials and research: new technologies and techniques АММ&R2021», ВКУ Д. Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Казахстан, 19 февраля 2021г.;

3. «14-ая международная конференция «НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ: ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ, КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ, СВАРКА», г.Минск, Белоруссия, 09-11 сентября 2020г.;

4. «Порошковая металлургия: Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка» г.Минск, Белоруссия, 07-09 апреля 2021 г.;

5. «XXXIX. Jesiennej Szkoły Tribologicznej», Польша, 01-04 сентября 2021г.;

6. «III International Scientific Forum “Nuclear Science and Technologies», г.Алматы, Казахстан, 20-24 сентября 2021г.;

7. круглый стол НАО «ВКУ им. С.Аманжолова» «Инновационные технологии в термоядерной энергетике и машиностроении», г.Усть-Каменогорск, Казахстан, 19 апреля 2021г.;

8. «IX International Scientific Conference «ACTUAL PROBLEMS OF SOLID STATE PHYSICS» (APSSP-2021), г.Минск, Белоруссия, 22-26 ноября 2021г.;

9. «IX международная конференция Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала», г.Курчатов, Казахстан, 07-09 сентября 2021г.;

10. «15-й Международная конференция «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка», г.Минск, Белоруссия, 14-16 сентября 2022г.;

11. «The 10th International Conference on Nanomaterials and Advanced Energy Storage Systems», г.Нур-Султан, Казахстан, 04-06 августа 2022г.;

12. Международная научно-практическая конференция «Увалиевские чтения-2022» на тему «Актуальные проблемы науки и образования в условиях современных вызовов», г.Усть-Каменогорск, Казахстан, 23 сентября 2022г.

Кроме того, основные результаты докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры физики, объединенных научных семинарах, на Научно-техническом совете ВКУ им. С. Аманжолова.

Публикации:

Основные результаты диссертации опубликованы в 13 публикациях, в том числе в 2-х зарубежных научных изданиях, входящих в базу данных Scopus и Web of Science (1. «Coatings», процентиль – 51%, квартиль (Q) – Q2, IF – 2.436, CiteScore 2,4; 2. «Crystals», процентиль – 50%, квартиль (Q) – Q2, IF – 2.67, CiteScore 3,2); в 4-х изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере образования Министерства Просвещения РК (1. «Вестник НЯЦ РК», серия физические науки; 2. «Reports of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan», серия физические и химические науки; 3. «Physical Sciences and Technology», серия физические науки; 4. «Reports of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan», серия физические и химические науки); 7-ми материалах международных конференций и в 3-х патентах на изобретения РК (1. №35716, заявл. 03.04.21, опубл. 17.06.22, Бюл. №24; 2. №35713, заявл. 03.04.21, опубл. 17.06.22, Бюл. №244; 3. №35088, заявл. 02.04.20, опубл. 28.05.21, Бюл. №21).

На основании проведенных исследований и анализе полученных результатов можно утверждать, что метод магнетронного распыления рекомендуется для композиционного покрытия Cr-Al-Co-Y в качестве простого, экономически более выгодного способа нанесения покрытий. В дальнейшем, в целях улучшения эксплуатационных характеристик покрытия, целесообразно усовершенствовать технологию магнетронного распыления композиционных

покрытий.

Проведенные исследования структурно-фазового состояния и механических свойств композиционного покрытия в дальнейшем позволят применять полученные зависимости и оценить структурные факторы, дающие максимальный вклад в эксплуатационные свойства готовых изделий, в частности лопаток ГТД, а также позволят предложить рекомендации по усовершенствованию технологий инженерии поверхности.

Поставленные в диссертации задачи решены в полном объеме, цель диссертационной работы достигнута. Проведены все намеченные, сложные в исполнении, экспериментальные работы и сравнительный анализ полученных результатов совместно с научными консультантами и коллегами. Полученные результаты и выводы не противоречат основным положениям физики конденсированного состояния и термодинамики фазовых превращений металлов и сплавов.

Получаемые по предлагаемому способу композиционные покрытия могут быть использованы в разных отраслях промышленности для упрочнения деталей, увеличения их эрозионной стойкости и износостойкости. Расчетно-экспериментальный метод прогнозирования ресурса покрытий позволил установить, что лопасти имеют неравномерный износ. Данные результаты позволяют предложить рекомендации по нанесению градиентных по толщине покрытий.

Высокий уровень выполненной работы обеспечивается тем, что результаты получены с применением хорошо апробированных “классических” методов экспериментальных исследований в специализированных лабораториях Национальной научной лаборатории коллективного пользования ВКУ С. Аманжолова, инженерного профиля ВКТУ им. Д. Серикбаева. Литературный обзор по теме диссертации охватывает современные работы ученых ведущих стран мира. Полученные результаты анализируются в сравнении с известными данными. Они опубликованы в известных профильных зарубежных журналах, входящих в базу данных ThomsonReuters и Scopus, обсуждены на ряде международных конференций, проведенные в СНГ и в странах дальнего зарубежья, защищены патентами на изобретения.

Анализ полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Разработан магнетронный способ нанесения композиционных покрытий Cr-Al-Co-Y, который позволяет формировать плотные покрытия без ярко выраженной столбчатой структуры, характерной для металлических покрытий. Определены оптимальные режимы нанесения композиционных покрытий. Получены многослойные (1-но, 2-х, 4-х и 8-мислойные) покрытия с управляемой концентрацией составляющих элементов Cr, Al, Co, Y.

2. Изучено структурно-фазовое состояние многослойных покрытий Cr-Al-Co-Y. Исследования показали, что в покрытиях формируется развитая межфазная граница между покрытием и подложкой, а также между самими слоями, что хорошо видно на всех образцах. Установлено, что многослойные покрытия в исходном состоянии являются преимущественно

рентгеноаморфными. При этом для 2-хслойного покрытия наблюдается наличие поликристаллических фаз ( $\text{CoO}$ ,  $\text{AlSi}_{0.5}\text{O}_{2.5}$  и  $\text{SiO}_2$ ). Было отмечено, что концентрация хрома в покрытии растёт с увеличением количества слоев, с пропорциональным уменьшением количества кобальта. Установлено, что 4-хслойное покрытие обладает максимальным значением  $R_a$  шероховатости поверхности и микротвердости, что делает его наиболее трещиностойкой системой из всех исследуемых в данной работе. Обнаружено, что уровень эрозионной (абразивной) стойкости всех образцов составляет в среднем  $9,8598 \times 10^{-15}$  кг/(с\*м<sup>2</sup>), при этом 4-х и 8-мислойные покрытия, в отличие от 1-но и 2-хслойных, показывают повышение стойкости на 7-9 %.

3. Изучены особенности влияния термической обработки на структурно-фазовые состояния и свойства композиционного покрытия Cr-Al-Co-Y. Выявлено, что основным процессом, происходящим при термической обработке является формирование фазы шпинельного типа ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CoO}$ ,  $\text{AlSi}_{0.5}\text{O}_{2.5}$ ,  $\text{CrAl}_{0.42}\text{Si}_{1.58}$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CoCr}_2\text{O}_4$ ). Их окончательное формирование для всех многослойных покрытий происходит в диапазоне температур 800-1000 °С. Установлено, что структура подвергшихся термическому воздействию образцов столбчатая, наличие слоев хорошо различимо во всех режимах ПЭМ и РЭМ. Было замечено, что содержание кобальта с увеличением температуры отжига уменьшается. Показано, что с повышением температуры значения микротвердости и шероховатости покрытий увеличиваются. Было обнаружено незначительное увеличение эрозионной (абразивной) стойкости ( $9,0122 \times 10^{-15}$  кг/(с\*м<sup>2</sup>)) после термообработки при 400 °С, по сравнению с теми же образцами в исходном состоянии. В результате исследований установлено, что значение эрозионной (абразивной) стойкости отожженных образцов в среднем уменьшилось на 16 %.

4. По результатам расчетно-экспериментального метода прогнозирования ресурса покрытий и схемы строения покрытий установлено, что рабочая поверхность лопаток ГТД имеет неравномерный износ. При этом расчёты показали, что ресурс рабочей поверхности лопаток ГТД с покрытиями на основе Cr-Al-Co-Y примерно в два раза выше, чем материала без покрытий.