

## АННОТАЦИЯ

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

**ХОЖАНОВ АЛЕКСАНДР РАФАЭЛЬЕВИЧ**

### **ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ С ЗАДАННОЙ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ МЕТОДОМ РОБОТИЗИРОВАННОГО МИКРОПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ**

**Ключевые слова:** микроплазменное напыление (МПН), покрытие, пористость, шероховатость, адгезия, фазовый состав, биосовместимость, износостойкость, электропроводность, электронная микроскопия, регрессионный анализ.

**Основная идея данного исследования:** диссертация посвящена получению функциональных покрытий с заданной структурой и рядом физико-механических свойств методом роботизированного микроплазменного напыления. Метод микроплазменного напыления (МПН) относится к группе методов термического плазменного напыления покрытий, которые применяются в различных отраслях промышленности для получения защитных и терморезистивных покрытий, а также применяются для создания покрытий из биосовместимых материалов для медицинских имплантатов. Среди различных существующих процессов термического плазменного напыления, МПН характеризуется малой мощностью источника плазмы (до 5 кВт) и малым диаметром пятна плазменной струи на поверхности распыления (до 10 мм), что может обеспечить снижение потерь материала при напылении и низкий подвод тепла к подложке. МПН, в отличие от традиционных методов термического напыления, может обеспечить покрытие мелких деталей и узлов, в том числе сложной геометрии, и позволяет наносить покрытия на тонкостенные изделия без опасности их перегрева и коробления. Целенаправленное варьирование основных параметров МПН, таких как сила электрического тока, расход плазмообразующего газа, расстояние напыления, расход напыляемого материала (проволоки или порошков), скорость перемещения плазменной струи по поверхности изделия и др., в перспективе позволяет получить требуемую структуру покрытия (в частности, с регулируемой пористостью) и обеспечить хорошую адгезионную прочность покрытия, так как степень нагрева частиц материала зависит от времени их пребывания в плазменной струе и может регулироваться подбором параметров МПН. Применение роботизированных методов плазменного напыления позволяет прецизионно точно поддерживать такие основные параметры МПН, как дистанция и скорость напыления, повышает производительность и безопасность процесса.

**Актуальность.** Проблема создания материалов с прогнозируемыми (контролируемыми, заданными) структурой и свойствами – это один из основных научных вопросов материаловедения. Принципиальным решением

при разработке новых материалов является создание функциональных покрытий. Покрытие представляет собой слой или пленку материала, отличного по химическому составу или характеристикам (например, пористости) от материала основы (подложки) и несущего функцию, не свойственную основному материалу. Таким образом, создание новых композиций подложки и покрытия является перспективным направлением материаловедения: сохраняя функциональные свойства основы, композиция приобретает новые функциональные свойства поверхности за счет покрытия. Исходя из функций, которые необходимо придать материалу основы, выбирается материал, состав покрытия и способы его формирования. Эксплуатационная надежность композиции «подложка - покрытие» обеспечивается сочетанием механических и физико-химических свойств составляющих ее материалов и хорошей адгезией. Прогнозирование свойств покрытий основывается также на возможности формирования определенных микроструктур и фаз в данной композиции. Совершенствование методов получения функциональных покрытий с заданной структурой и свойствами с использованием современных технологических решений является важной и актуальной задачей. Новые технологии с интеграцией промышленных роботов в процессы напыления позволяют выйти на новый уровень производства, добиться значительного улучшения свойств поверхности за счет формирования на рабочих поверхностях промышленных изделий покрытий с особыми свойствами. Роботизированные системы для процессов плазменного напыления позволяют значительно повысить точность и качество напыления, оптимизировать обработку и сократить производственный цикл. Разработка роботизированных методов микроплазменного напыления является важной научно-технической задачей, решение которой необходимо для получения новых методов и подходов технической физики к созданию новых материалов с прогнозируемыми свойствами.

Исследование проведено в рамках проектов с госбюджетным (грантовым) финансированием Республики Казахстан:

2022 – 2024 - № AP13068317 «Разработка новых алгоритмов управления роботом-манипулятором для технологий 3D сканирования и аддитивного микроплазменного напыления покрытий». Научный руководитель А.А. Кадыролдина.

2022 – 2024 - № AP14869862 «Инновационные технологии изготовления покрытий для совершенствования медицинских имплантатов». Научный руководитель Ю.И. Сафарова.

2018-2020 – № AP 05130525 «Интеллектуальная роботизированная система для плазменной обработки и резки крупногабаритных изделий сложной формы». Научный руководитель Д.Л. Алонцева

**Объектом исследования** диссертационной работы являются покрытия из биосовместимых или износостойких или терморезистивных материалов (керамических порошков и металлических проволок) нанесенные на

металлические подложки методом роботизированного микроплазменного напыления, а также материалы подложек.

**Предметом исследования** являются закономерности формирования заданных микроструктур покрытий в зависимости от параметров микроплазменного напыления (МПН); структурно-фазовые состояния покрытий и подложек, обусловленные МПН; влияние параметров МПН на эффективность процесса и на физико-механические свойства покрытий, а также выбор оптимальных параметров МПН.

**Цель исследования:** получение функциональных покрытий с контролируемыми характеристиками методом роботизированного микроплазменного напыления путем выбора оптимальных режимов МПН.

**Задачи исследования:**

- 1) Выполнить анализ современного состояния проблемы получения функциональных покрытий с контролируемой микроструктурой и заданными свойствами, обосновать выбор материалов, технологического оборудования и методов экспериментального исследования.
- 2) Провести планирование факторного эксперимента по МПН функциональных покрытий для дальнейшего напыления согласно матрице эксперимента и установления методами регрессионного анализа зависимостей характеристик покрытий от параметров МПН.
- 3) Провести исследование параметров фигур металлизации и дорожек напыления для установления закона распределения материала покрытия при напылении и выработки рекомендации для роботизированного напыления покрытий с равномерной и контролируемой толщиной.
- 4) Осуществить роботизированное МПН покрытий из биосовместимых материалов с выбранными параметрами напыления на подложки титанового сплава для получения экспериментальных образцов. Получить методом МПН малогабаритный многослойный резистивный нагревательный элемент, состоящий из изолирующего и электропроводящего слоев.
- 5) Провести исследование структуры и свойств (в зависимости от функционального назначения) покрытий и их подложек методами оптической и электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, адгезионных испытаний, тестов микротвердости или измерений электрической прочности и проводимости и установить закономерности влияния параметров МПН на коэффициент использования материала и на пористость покрытий, дать научное обоснование выбора оптимальных параметров напыления, позволяющих эффективно получить покрытия с заданными характеристиками.
- 6) Выполнить апробацию найденных решений и рекомендаций: выполнить роботизированное МПН биосовместимых покрытий имплантатов по рекомендованным оптимальным режимам и разработать способ роботизированного МПН покрытия из биосовместимого материала; осуществить роботизированное МПН защитного покрытия на изношенные участки плиты дробилки из стали Гадфильда и провести производственные испытания восстановленной плиты.

**Основные методы исследования:** методы планирования факторного эксперимента, регрессионный анализ, методы статистической обработки результатов, экспериментальные методы исследования структуры и свойств материалов: сканирующая и просвечивающая электронная микроскопия, рентгеноструктурный фазовый анализ, оптическая микроскопия, энергодисперсионный элементный анализ, адгезионные испытания, исследования электрической прочности покрытий.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1) Закономерности влияния параметров МПН на характеристики функциональных покрытий и научное обоснование выбора оптимальных параметров напыления, позволяющих эффективно получить покрытия разного функционального назначения с заданными характеристиками.

2) Способ роботизированного МПН покрытия из биосовместимого материала, заключающийся в нанесении на металлическую титановую основу имплантата циркониевого покрытий толщиной 400 мкм с пористостью  $20,5 \pm 2,00$  %, размерами пор до 300 мкм, отличающийся тем, что напыление осуществляют при помощи микроплазмотрона, закрепленного на руке робота-манипулятора, движущегося по заданной 3Д - модели изделия с постоянной скоростью 2,3 м/мин, при этом контроль толщины и пористости покрытий обеспечивается точным соблюдением выбранных на основе факторного планирования параметров микроплазменного напыления.

3) Совокупность результатов апробации роботизированной системы МПН, обладающей преимуществами в точности и эффективности выполнения технологического процесса по сравнению с существующими решениями.

**Научная новизна работы и основные результаты, доказанные в диссертации и в публикациях по теме исследования:**

1) Установлены новые закономерности влияния параметров МПН на эффективность напыления и характеристики пористости функциональных покрытий из биосовместимых и терморезистивных материалов, показано, что наибольшее влияние на характеристики пористости и коэффициента использования материала покрытия оказывают дистанция напыления, сила тока и расход плазмообразующего газа, подтверждено, что управляя параметрами МПН можно получать покрытия с желаемыми характеристиками пористости и удовлетворительной адгезией к подложке, рекомендованы конкретные параметры МПН, оптимальные для получения определенного типа покрытий.

2) Разработан новый способ роботизированного МПН циркониевого покрытия на металлическую титановую основу медицинского имплантата, позволяющий получить покрытие с равномерной толщиной 400 мкм и с заданными характеристиками пористости порядка 20 % и размерами пор до 300 мкм посредством перемещения роботом-манипулятором микроплазменного источника по заданной 3Д - модели имплантата с постоянной заданной скоростью и точным соблюдением выбранных на основе факторного планирования параметров МПН.

3) Получена совокупность новых результатов апробации роботизированной системы МПН, показывающая преимущества в точности выполнения технологических процессов по сравнению с существующими решениями (полуавтоматическое, ручное МПН). Робот-манипулятор перемещает микроплазмотрон вдоль 3Д-модели обрабатываемого плазмой изделия с точным соблюдением дистанции напыления, скорости перемещения и перпендикулярности падения плазменной струи на поверхность изделия, обеспечивая заданный диапазон пористости и равномерность толщины напыляемого покрытия.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 5-ти международных конференциях: 1) 6th International Thermal Spraying and Hardfacing Conference (ITSHC), 22 -23 сентября 2022 г., г. Вроцлав, Польша; 2) 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), 22 -24 сентября 2021 г., г. Краков, Польша (онлайн); 3) The International Conference "Advanced materials manufacturing and research: new technologies and techniques "(AMM&R-2021 online), 19 февраля 2021 г., г. Усть-Каменогорск, Казахстан; 4) 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), 14-26 сентября. 2020 г., г. Томск, Россия; 5) VI Международная научно-техническая конференция студентов, магистрантов и молодых ученых «Творчество молодых инновационному развитию Казахстана», 9-10 апреля 2020 г., ВКГТУ, Усть-Каменогорск, Казахстан.

**Публикации.** Всего по теме диссертационной работы опубликовано 17 работ, из их: 5 в изданиях, рекомендуемых Комитетом; 5 в международных рецензируемых журналах, индексируемых в базе в Scopus и имеющих процентиль по CiteScore не ниже 25% и (или) индексируемых в данных информационной компании Web of Science Core Collection, Clarivate Analytics и (или) имеющих ненулевой импакт-фактор, 6 в трудах международных конференций (из них 3 статьи проиндексированы в Scopus) и 1 патент на полезную модель РК.

**Диссертация имеет практическое значение:** проведено производственное испытание промышленного изделия (дробящей плиты), восстановленной и упрочненной путем роботизированного микроплазменного напыления (по рекомендованному в результате численного эксперимента режиму) покрытия из порошка композиционного сплава АН-35 (ГОСТ 21448-75), подтверждающее увеличение срока службы плиты щековой дробилки с микроплазменным покрытием изношенной поверхности (Акт производственных испытаний «ИП Абакумов С.А.», № 1 от 01.10.2020).

**Для внедрения в практику предлагается:** патент №5576 на полезную модель «Способ роботизированного микроплазменного напыления циркониевых покрытий» по заявке № 2020/0547.2. Дата приоритета 20.11.2020

**Структура и объём диссертации:** диссертация состоит из введения, 4-х основных разделов с выводами по каждому разделу, заключения, списка

использованных источников из 143 наименований, 2-ух приложений. Основное содержание диссертации изложено на 115 страницах компьютерного текста, включает 42 рисунка, 19 таблиц.