

## **АННОТАЦИЯ**

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности  
6D072300 – «Техническая физика»

**Кеңесбекова Айдары Бақытбекұлы**

**«Разработка воздушно-плазменного способа нанесения износостойких покрытий на основе TiN на поверхности быстрорежущих сталей»**

Диссертационная работа посвящена совершенствованию и разработке воздушно-плазменного способа нанесения износостойких покрытий на поверхности быстрорежущих сталей, а также изучению влияния технологических параметров напыления на формирование структурно-фазового состояния и трибологических свойств покрытий на основе TiN.

### **Актуальность темы исследования.**

Технологические процессы, в которых материал подвергают воздействию концентрированных потоков энергии в виде плазмы в настоящее время достаточно распространены в промышленности. Плазменную струю широко используют в качестве источника нагрева, распыления и ускорения частиц при напылении покрытий. Задачей разработки технологии плазменного напыления является получение на поверхности детали упроченного слоя с заданными эксплуатационными характеристиками (износостойкость, твердость, адгезионная прочность и т.д.).

Одним из методов плазменного напыления является воздушно-плазменное напыление. В основе этой технологии лежит нагрев напыляемого материала до жидкого и пластического состояния, перенос его высокотемпературной плазменной струей к подложке с последующим образованием слоя покрытия. Несмотря на достигнутые успехи в области практической реализации воздушно-плазменных процессов актуальным остается вопрос повышения тепловой эффективности плазменного напыления. Данный вопрос решается созданием высокоресурсных плазмотронов. Задача разработки плазмотрона сводится к созданию относительно простой, ремонтпригодной конструкции, обеспечивающей преобразование электрической энергии дуги в тепловую энергию плазменной струи с высокой производительностью, что позволяет эффективно наносить порошковые материалы с различными свойствами.

При воздушно-плазменном напылении в качестве напыляемого материала широко используют порошки металлов, сплавов и оксидов. Менее распространено применение порошков на основе бескислородных тугоплавких соединений, в частности нитридов. В ряде случаев для получения нитридных покрытий выдвигаются специальные требования, обусловленные особенностями технологического процесса. Процесс воздушно-плазменного напыления нитридных покрытий сопровождается окислением из-за реакции покрытий с кислородом воздуха при высоких температурах. Решением таких проблем является применение в конструкции плазмотрона «щитовую крышку». Предлагается применить специальный плазмотрон, который оснащен дополнительным каналом, через который подается порошок и азот. Данные особенности плазмотрона обеспечивают

образование нитридов за счет реакции азота с металлическими порошками, а также образования азотной оболочки вокруг плазменной струи, которая предотвращает сильное окисление порошков и покрытий. Данный способ является простым и универсальным, что позволяет обрабатывать детали большого габарита и сложной конфигурации. Однако, данный способ нанесения нитридных покрытий широко не распространен и не внедрен в производство и требует детального изучения закономерности формирования покрытий в зависимости от конструкционной особенности и от технологических параметров напыления. Нитридные покрытия чаще всего получают методами PVD и CVD и широко применяются для упрочнения режущих инструментов из быстрорежущих сталей. Воздушно-плазменную технологию можно рассматривать как высокопроизводительный альтернативный способ нанесения износостойких нитридных покрытий на режущие инструменты.

Таким образом, несмотря на заметный прогресс в области воздушно-плазменного напыления, существует необходимость решения ряда вопросов: разработка малогабаритного, простого оборудования для воздушно-плазменного напыления нитридных покрытий, обеспечивающего расширение технологических возможностей процесса; разработка высокоресурсного плазмотрона с повышенной тепловой эффективностью, отличающегося относительной простотой и ремонтпригодностью; автоматизация процесса плазменного напыления за счет применения промышленных роботов; создание экспериментально обоснованной концепции о влиянии плазменных нитридных покрытий на стойкость режущих инструментов из быстрорежущих сталей.

В связи с вышеизложенным, тема диссертационной работы, посвященная совершенствованию и разработке воздушно-плазменного способа нанесения износостойких покрытий на поверхности быстрорежущих сталей, а также изучению влияния технологических параметров напыления на формирование структурно-фазового состояния и трибологических свойств покрытий на основе TiN представляется актуальной.

**Цель работы:** разработка воздушно-плазменного способа получения износостойких TiN покрытий на поверхности режущих инструментов из стали P6M5 и изучение влияния технологических параметров напыления на формирование структурно-фазового состояния и трибологических свойств покрытий на основе TiN.

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

- создание воздушно-плазменной установки для нанесения порошковых покрытий;
- разработка и исследование характеристик плазмотрона для воздушно-плазменного напыления порошковых покрытий;
- исследование структурно-фазового состояния и характеристик TiN покрытий в зависимости от параметра воздушно-плазменного напыления;
- исследование механико-трибологических свойств TiN покрытий, полученных методом воздушно-плазменного напыления;

– проведение стендовых испытаний режущего инструмента с TiN покрытием, полученным методом воздушно-плазменного напыления.

**Объект исследования** – покрытия на основе TiN, полученные на поверхности быстрорежущей стали Р6М5 методом воздушно-плазменного напыления.

**Предмет исследования** – режим работы плазмотрона, структурно-фазовые состояния и механико-трибологические свойства TiN покрытий на поверхности режущих инструментов, стендовые испытания режущего инструмента с TiN покрытием.

**Методы исследования.** Для выполнения поставленных задач в работе использовались современные экспериментальные методики исследования состава, структуры и свойств покрытий: электронная микроскопия; рентгенофазовый анализ; методы микро- и наноиндентирования, скретч-тестирования; определение адгезии методом отрыва; потенциометрический метод испытания на коррозию; трибологические испытания по схеме «шар-диск» и «линейный возвратно-поступательный износ»; стендовые испытания сверла; термический анализ конструкции плазмотрона методом конечных элементов в программном комплексе SolidWorks. В качестве инструментальных средств применяли следующее оборудование и приборы: рентгеновский дифрактометр X'PertPRO, электронный сканирующий микроскоп TESCAN MIRA3 с энергодисперсионным рентгеновским детектором (EDAX) модели INCA ENERGY; потенциостат-гальваностат Р-150; адгезиметр Elcometer 510; «скретч-тестер» CSEM Micro Scratch Tester; микротвердомер Металаб 502; нанотвердомер НаноСкан-4DКомпакт; профилометр модели 130; трибометр TRB<sup>3</sup>, а также разработанный, изготовленный и протестированный нами стенд для оценки износостойкости материалов и сил трения в процессе резания.

При выполнении работы использовали ресурсы и оборудование Научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология» Восточно-Казахстанского университета имени Сарсена Аманжолова, Карагандинского университета имени академика Е.А. Букетова, научно-производственной фирмы ТОО «PlasmaScience», Вроцлавского университета науки и технологий (г. Вроцлав, Польша) и Центра измерения свойств материалов ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск, Россия).

#### **Научная новизна работы:**

– разработан высокоресурсный плазмотрон для воздушно-плазменного напыления порошковых покрытий, который защищен патентом на изобретение «Плазматрон для напыления» (№34334 опубликован 14.08.2020 г.). Преимущество разработанного плазмотрона состоит в том, что анод выполнен цельносварным и его поверхность имеет радиаторный профиль, что обеспечивает эффективное охлаждение и надёжность при повышенных давлениях охлаждающей жидкости;

– разработан способ воздушно-плазменного напыления износостойких TiN покрытий на поверхности режущего инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 и предложена методика оценки износостойкости сверла и сил трения в процессе резания на новоразработанном испытательном стенде.

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

1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, обосновывающие тепловую эффективность плазмотрона с цельносварным анодом, поверхность которого имеет радиаторный профиль.

2. Технологические приемы получения покрытий на основе TiN с высокой твердостью и стойкостью к износу методом воздушно-плазменного напыления.

3. Результаты разработки и внедрения специального технологического оборудования воздушно-плазменного напыления износостойких TiN покрытий на поверхности режущего инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, которое позволяет увеличить ресурс сверл из стали Р6М5 до 2 раз.

**Практическое значение научных результатов.** Практическая значимость работы заключается в разработке:

- высокоресурсного плазмотрона для воздушно-плазменного напыления, который позволяет наносить нитридные покрытия с высокими трибологическими характеристиками;

- методики для определения сил трения сверла в процессе резания, который реализуется на специальном новоразработанном оборудовании в виде стенда, изготовленного на базе токарно-винторезного станка.

Полученные данные в результате исследований позволяют рекомендовать воздушно-плазменную технологию напыления, а также предложенную модель плазмотрона при нанесении покрытий на основе нитрида титана на поверхности режущих инструментов из быстрорежущей стали для практического применения в промышленности.

**Связь работы с научно-исследовательскими проектами.** Диссертация на тему «Разработка воздушно-плазменного способа нанесения износостойких покрытий на основе TiN на поверхности быстрорежущих сталей» соответствует приоритетному направлению развития науки «Энергетика и машиностроение» и выполнена в соответствии со следующими проектами, финансируемыми Комитетом науки МНВО РК:

– BR05236748 «Исследования и разработка инновационных технологий получения износостойких материалов для изделий машиностроения», программно-целевое финансирование на 2018-2020 гг.;

– AP14972882 «Разработка научно-технологических основ получения интерметаллидных покрытий методом воздушно-плазменного напыления для применения в энергомашиностроении», грантовое финансирование молодых ученых по проекту «Жас ғалым» на 2022-2024 гг.

**Личный вклад автора.** Приведенные в диссертации основные результаты получены автором самостоятельно, либо при его непосредственном участии. Цели и задачи были сформулированы совместно с научными консультантами. Подготовка публикаций проводилась совместно с соавторами.

**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: 14-ый Международный симпозиум «Порошковая металлургия: Инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка», г. Минск, Белоруссия, 9-11 сентября 2020 г; VI Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛаПлаз-2020», г. Москва, Россия, 11-14 февраля 2020 г.; Международная научно-практическая конференция «The international conference - Advanced materials manufacturing and research: New technologies and methods», г. Усть-Каменогорск, Казахстан, 19 февраля 2021 г.; Международная конференция «World Conference on Engineering, Technology and Applied Science», г. Бангкок, Тайланд, 07 ноября 2022, а также обсуждались на научных семинарах факультета базовой инженерной подготовки Восточно-Казахстанского технического университета имени Д. Серикбаева, Научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология» Восточно-Казахстанского университета имени Сарсена Аманжолова и научно-производственной фирмы ТОО «PlasmaScience».

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 13 работ, из них 1 статья 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, 6 работ в материалах республиканских и международных конференций, 1 монография в соавторстве и 1 патент Республики Казахстан на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников из 131 наименований и 4 приложений. Общий объем диссертации 103 страниц, включая 70 рисунка и 15 таблиц.