

УТВЕРЖДАЮ
Первый проректор
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Санкт-Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II»
д.т.н., профессор
Рудаков Марат Леонидович


« 26 » _____ 1 _____ 2025 г.



ОТЗЫВ

**ведущей организации – федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»
(г. Санкт-Петербург) на диссертацию Шмакова Ильи Михайловича
«Повышение функциональных свойств ответственных изделий
машиностроения на основе применения усовершенствованной технологии
подготовки их поверхности с последующим осаждением покрытий»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и
физико-технической обработки»**

Актуальность темы диссертации

Ощутимый прогресс в развитии технологий невозможен без создания новых материалов, обладающих сочетанием ряда отличительных свойств. В большинстве случаев от конструкционных материалов требуется высокая твердость и износостойкость в сочетании с достаточной пластичностью, низким удельным весом, хорошей обрабатываемостью, теплостойкостью и стойкостью к коррозии. При этом такой материал должен также иметь приемлемую себестоимость. Создание таких материалов невозможно без применения новых подходов, включающих применение композитных структур. Примером таких структур являются модифицирующие покрытия, позволяющие повысить поверхностную твердость и износостойкость в сочетании со стойкостью к коррозии. При этом такие покрытия могут осаждаться на различные субстраты, позволяя расширить область их применения, а также надежность и долговечность изделий из различных материалов. Таким образом, технологии осаждения покрытий являются современной и энергично развивающейся областью. Исследования в данной области позволяют дополнительно повысить эффективность применения покрытий и технологий их осаждения. В работе Шмакова Ильи Михайловича предложен новый подход к технологии подготовки поверхности перед осаждением покрытий. Данный

подход позволяет не только повысить качество осаждаемых покрытий, но и упростить процесс их осаждения, повысить энергетическую эффективность и снизить в итоге себестоимость. Считаем тематику данной диссертационной работы актуальной и значимой для современной технологической науки.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем работы: полный текст диссертации содержит 140 страниц, включая 59 рисунков и 5 таблиц, список литературы из 107 наименований и 1 приложение.

Во введении обоснована актуальность проблемы, обозначена цель исследований, указаны методические и теоретические положения работы, изложена научная новизна и практическая ценность, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В *первой главе* приведен анализ и дано сравнение методов подготовки (очистки и термоактивации) поверхности субстрата при использовании вакуумно-дуговых процессов (КИБ-МеVVA) осаждения покрытий на субстраты различного состава. Рассмотрены теоретические аспекты и примеры практической реализации данных методов. В результате анализа литературных источников были сформулированы цели и задачи исследований, предусмотренные настоящей работой, дано теоретическое обоснование научной гипотезы, в полном объеме сформулированной во второй главе.

Во *второй главе* содержится описание методики проведения исследований. Давление рабочего газа в камере поддерживалось на разных этапах в пределах 1-10 Па. Напряжение на субстрате от 300 до 1500 В. Проведены сравнения свойств покрытий при использовании двух различных методов очистки и термоактивации поверхности: ионная бомбардировка (в дальнейшем обозначается, как ИВ) и тлеющий разряд с частичной реализацией эффекта полого катода (в дальнейшем обозначается, как НСМ(GD)). Установлено, что при нагреве методом НСМ можно добиться практически равномерного нагрева деталей по всему объему с разницей температур не более 50...60°С, что крайне сложно обеспечить при нагреве ИВ. Была получена зависимость температуры поверхности образцов от времени нагрева методом НСМ при различных параметрах. Представленные графики показывают, что предложенным методом при определенных параметрах процесса можно быстро нагреть обрабатываемые детали в течение нескольких минут. Скорость нагрева существенно зависит от давления в вакуумной камере и от напряжения на подложке.

Проводится сравнение структуры и свойств покрытий, осажденных с применением предварительной термоактивации и очистки методами ионной бомбардировки (ИВ) и тлеющего разряда (НСМ(GD)) на твердосплавные пластины. Предварительная обработка поверхности субстрата методами ионной бомбардировки (ИВ) оказывает заметное влияние на состояние поверхностного слоя. Наблюдается вымывание кобальта из внешнего слоя твердосплавной матрицы, за счет чего формируются области локального

выкрашивания и разрушения твердосплавного субстрата. Интерфейс покрытия и субстрата имеет достаточно сложную слоистую структуру.

Результаты исследования режущих свойств при тчении стали 45 показывают, что при скорости резания 300 м/мин инструмент с покрытием НСМ показывает несколько менее активную динамику изнашивания по сравнению с инструментом с покрытием ИВ. При повышении скорости резания до 350 м/мин разница в динамике изнашивания становится более заметной и очевидной. Через 7 минут резания инструмент с покрытием по технологии ИВ достиг критерия предельного изнашивания, при этом инструмент с покрытием по технологии НСМ сохраняет работоспособность и не достиг предельного значения износа.

Результаты проведенных на фирме Jiangsu Tiangong Cemented Carbide Technology Co., Ltd. (КНР) испытаний показали, что пластины с покрытиями (Zr,Hf,Al)N и (Ti,Al,Cr)N показали высокую износостойкость при фрезеровании.

Таким образом, применение предварительной подготовки поверхности субстрата плазмой тлеющего разряда (технология НСМ) с рационально подобранными параметрами процесса обеспечивает износостойкость твердосплавных пластин с покрытиями на уровне, или даже выше пластин с коммерческими покрытиями CVD.

В третьей главе представлены результаты сравнения эксплуатационных свойств покрытия Ti-TiN, осажденного на субстраты из титанового и алюминиевого сплава, а также – нержавеющей стали с применением предварительной термоактивации и очистки методами ионной бомбардировки (ИВ) и тлеющего разряда (НСМ).

Было установлено, что оптимальная величины напряжения смещения на субстрате зависит от такого свойства материала субстрата, как теплопроводность. Чем выше величина теплопроводности материала, тем ниже оптимальная величина напряжения смещения.

В четвертой главе проведено сравнение параметров шероховатости поверхности образцов при воздействии ИВ (при использовании одного и двух катодов) и НСМ, в зависимости от времени обработки (15, 30 и 60 минут). Было установлено, что метод НСМ обеспечивает наилучшую шероховатость (Ra 0,18; Rz 3,50 мкм) по сравнению с методом ИВ.

Автореферат диссертации достаточно полно отражает структуру, содержание и результаты диссертационной работы.

Цель работы сформулирована следующим образом: повышение функциональных свойств ответственных изделий машиностроения из различных материалов (твердого сплава, титанового и алюминиевого сплавов, нержавеющей стали) на основе применения усовершенствованной технологии подготовки их поверхности (очистки и термоактивации) с последующим осаждением вакуумно-плазменных покрытий.

Поставленная **цель** была достигнута путем успешного решения следующих **задач**:

1. Изучить теплофизические особенности процесса подготовки (очистки и термоактивации) поверхности субстратов из различных материалов в плазме тлеющего разряда с реализацией эффекта полого катода.

2. Выполнить сравнительные аналитические и экспериментальные исследования различных процессов подготовки поверхности субстратов – традиционной обработки посредством ионной бомбардировки в плазме вакуумно-дугового разряда и обработки в плазме тлеющего разряда с реализацией эффекта полого катода.

3. Выявить влияние процессов очистки и термоактивации поверхности в плазме тлеющего разряда с реализацией эффекта полого катода на состояние поверхностного слоя субстратов из различных материалов, прочность интерфейса (адгезионную прочность) между субстратом и осаждаемым вакуумно-плазменным покрытием и другие свойства.

4. Установить взаимосвязи между свойствами материала субстрата и параметрами процесса очистки и термоактивации плазмой тлеющего разряда с реализацией эффекта полого катода, обосновать выбор и определить рациональные параметры, обеспечивающие наилучшую адгезионную прочность между вакуумно-плазменным покрытием и субстратом и функциональные свойства.

5. Выполнить комплексные испытания образцов из твердого сплава, титанового и алюминиевого сплавов, нержавеющей стали, обработанных с использованием плазмы тлеющего разряда с реализацией эффекта полого катода, и произвести оценку износостойкости образцов с покрытиями в условиях различного внешнего воздействия – механических нагрузок, коррозионного воздействия и др.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертации, подтверждаются комплексом теоретических исследований, основанных на законах и положениях теории резания материалов, физики твердого тела и методов прикладной математики, что обеспечивает методологическую строгость и внутреннюю согласованность результатов.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается экспериментальными данными, полученными с применением современного оборудования и аттестованных методик.

В целом представленная диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты, а выдвигаемые на защиту положения имеют важное научное и практическое значение. Содержание диссертационной работы полностью соответствует основным положениям, изложенным в автореферате. Заявленная цель и поставленные задачи исследования решены в полном объеме.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Установлены закономерности влияния параметров процесса очистки и термоактивации поверхности субстратов плазмой тлеющего разряда с реализацией эффекта полого катода на характеристики осаждаемых в последующем вакуумно-плазменных покрытий и износостойкость образцов с покрытиями в условиях механических нагрузок и коррозионного воздействия.

2. Выявлено качественное влияние процессов очистки и термоактивации поверхности субстратов (плазмой вакуумно-дугового разряда и плазмой тлеющего разряда с реализацией эффекта полого катода) на состояние поверхностного слоя и прочность интерфейса (адгезионную прочность) между субстратом и осаждаемым вакуумно-плазменным покрытием.

3. Установлены взаимосвязи между свойствами материала субстрата и параметрами процесса очистки и термоактивации плазмой тлеющего разряда с реализацией эффекта полого катода, а также обоснован выбор параметров, обеспечивающих наилучшую адгезионную прочность между вакуумно-плазменным покрытием и субстратом.

Практическая значимость:

1. Предложено и экспериментально обосновано применение усовершенствованной технологии подготовки (очистки и термоактивации) поверхности субстратов с использованием плазмы тлеющего разряда с реализацией эффекта полого катода с удержанием плазмы прикатодным потенциалом и последующим осаждением вакуумно-плазменных покрытий.

2. Разработаны рекомендации по практическому применению усовершенствованной технологии подготовки поверхности субстратов с использованием плазмы тлеющего разряда с эффектом полого катода и выбору рациональных режимов обработки для различных материалов (твердого сплава, титановых и алюминиевых сплавов, нержавеющей стали), обеспечивающих наилучшие функциональные свойства осаждаемых в последующем покрытий.

3. Предложена совокупность технологических рекомендаций, позволяющая повысить износостойкость изделий (режущих пластин). Результаты испытаний твердосплавных режущих пластин с покрытиями на Jiangsu Tiangong Cemented Carbide Technology Co. Ltd. (КНР), специализирующейся на производстве твердосплавных инструментов для металлообработки, продемонстрировали более высокую износостойкость образцов, обработанных в соответствии с предложенной усовершенствованной технологией очистки и термоактивации поверхности, в сравнении с образцами, изготовленными с использованием традиционной производственной технологией.

4. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» при подготовке магистров по направлениям 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» и 20.04.01 «Техносферная безопасность» в рамках преподавания дисциплины «Инновационные технологии машиностроительного производства». Опытно-промышленные испытания, проведенные в

производственных условиях, подтвердили высокую работоспособность твердосплавных инструментов с разработанными покрытиями. Результаты исследований приняты к внедрению в АО «Резьбовые технологии».

Апробация результатов работы

Результаты работы были доложены на следующих конференциях:

- XXI-й Международная научно-техническая конференция «Быстрозакаленные материалы и покрытия», 22-23 октября 2024 г., Московский авиационный институт, г. Москва;
- Школа молодых ученых «Адаптивные материалы и покрытия для высокотехнологичных отраслей промышленности», 27-28 ноября 2024 г., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», г. Москва;
- XI Международная научно-техническая конференция «Инновации в машиностроении» 4-5 сентября 2024 г., Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск;
- VIII Международный симпозиум по трибофатике, 13 августа 2025 г., г. Харбин, КНР.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на проведение научных исследований в рамках государственного задания (проект № FSFS-2023-0003).

По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 4 статьи в изданиях из перечня ВАК, 4 статьи в изданиях из базы цитирований Scopus и Web of Science.

Детальное рассмотрение диссертационной работы позволяет выявить следующие **основные достижения работы**:

1. Закономерности влияния параметров процесса очистки и термоактивации поверхности субстратов плазмой тлеющего разряда с реализацией эффекта полого катода на характеристики осаждаемых в последующем покрытий и износостойкость образцов с покрытиями в условиях механических нагрузок и коррозионного воздействия.

2. Взаимосвязи между свойствами материала субстрата, параметрами процесса очистки и термоактивации плазмой тлеющего разряда с реализацией эффекта полого катода и состоянием поверхностного слоя, а также прочностью интерфейса между субстратом и осаждаемыми покрытиями.

Наряду с несомненными достоинствами в работе выявлены следующие **замечания**:

1. В работе не использованы все имеющиеся методы исследования свойств покрытий, в частности – нано-ударный тест.

2. Проведены исследования шероховатости поверхности субстрата после предварительной обработки при различных параметрах, однако данные исследования проведены не для всех исследуемых материалов субстрата (например, нет таких исследований для твердого сплава), также было бы полезно сравнить шероховатость до и после осаждения покрытия.

3. Не понятно, зачем в автореферат, объем которого получился выше нормативного, вынесено примитивное исследование квадратичной функции на экстремум. К тому же, вторая производная указана с 17 знаками после запятой, из которых 13 – незначимые – нули.

4. В ряде случаев недостаточно полно описаны представленные иллюстрационные материалы. Например, нет описания позиций на рисунке 1 в автореферате; нет исчерпывающего описания графикам на рисунке 2.12 в диссертации (что такое В1, В2?), к тому же часть описания дана иероглифами.

5. В тексте автореферата и диссертации присутствуют орфографические ошибки.

Сделанные замечания не снижают общей научной и практической ценности диссертационной работы.

Соответствие диссертации научной специальности

Содержание диссертации соответствует требованиям паспорта научной специальности 2.5.5 Технология и оборудование механической и физикотехнической обработки (технические науки). Область исследований соответствует следующим пунктам паспорта специальности:

2. Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических, химических и комбинированных воздействий.

3. Исследование механических и физико-технических процессов в целях определения параметров оборудования, агрегатов, механизмов и других комплектующих, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, качества, экологичности и экономичности обработки.

Отрасль науки – технические науки, поскольку приведенные результаты исследований дают существенный технический эффект при использовании и внедрении.

Заключение

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что диссертация Шмакова Ильи Михайловича на тему «Повышение функциональных свойств ответственных изделий машиностроения на основе применения усовершенствованной технологии подготовки их поверхности с последующим осаждением покрытий» является научно-квалифицированной работой, в которой изложены новые научно-обоснованные результаты, имеющие важное значение при разработке технологии и оборудования механической и физико-технической обработки.

Таким образом, считаем, что диссертация Шмакова Ильи Михайловича «Повышение функциональных свойств ответственных изделий машиностроения на основе применения усовершенствованной технологии подготовки их поверхности с последующим осаждением покрытий»

