

На правах рукописи



Шмаков Илья Михайлович

**Повышение функциональных свойств изделий машиностроения
на основе применения усовершенствованной технологии
подготовки их поверхности с последующим осаждением
вакуумно-плазменных покрытий**

Специальность
2.5.5 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре высокоэффективных технологий обработки федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва.

Научный руководитель: **Верещака Алексей Анатольевич**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры высокоэффективных технологий обработки федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва

Официальные оппоненты: **Артамонов Евгений Владимирович**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры станков и инструментов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень

Саблин Павел Алексеевич
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроение» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», г. Санкт-Петербург

Защита состоится 25 декабря 2025 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.332.01 при ФГАОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» по адресу: 127055, г. Москва, Вадковский пер., д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» и на сайте <https://stankin.ru/nauka-i-innovatsii/dissertatsionnye-sovety-i-doktorantura/dissertatsionnye-sovety/24-2-332-01-d-212-142-01/shmakov-ilya-mikhaylovich/index.php>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения (организации), просим направлять в диссертационный совет 24.2.332.01 по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.332.01, к.т.н.



Е.С. Сотова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Глобальный рынок технологий физического осаждения вакуумно-плазменных покрытий (PVD), включающий оборудование, материалы и технологические услуги, является существенным и быстрорастущим сегментом современного производства, что обусловлено растущим спросом в инструментальной, аэрокосмической промышленности, автомобилестроении и других отраслях машиностроения на высокоэффективные износостойчивые, коррозионностойкие и термобарьерные покрытия для повышения производительности и долговечности ответственных компонентов и деталей из твердых сплавов, титановых и алюминиевых сплавов, конструкционных сталей и других материалов. Опубликованный ведущей экспертной международной компанией The Business Research Company аналитический отчет в области исследований рынка, демонстрирует, что по итогам 2024 года объем мирового рынка PVD-технологий превышает 28 млрд долларов и на ближайшее десятилетие прогнозируется его ежегодный рост на уровне 8,5 %, что заметно превышает средние темпы роста промышленного производства. Таким образом, технологии и оборудование для осаждения PVD-покрытий остаются востребованным и динамично развивающимся технологическим сектором, стимулирующим инновации и экономический рост. Несмотря на большой объем исследований, выполняемых в ведущих научных центрах США, Евросоюза, Китая, России и ряда других стран, а также достигнутый в последние годы прогресс, имеются значительные резервы для дальнейшего повышения эффективности PVD-технологий, расширения области применения и повышения функциональных свойств покрытий, осаждаемых с использованием указанных технологий. Одним из направлений, имеющих значительный потенциал для повышения функциональных свойств изделий с вакуумно-плазменными покрытиями, сегодня является разработка и совершенствование технологий предварительной обработки (очистки и термоактивации) поверхностного слоя с последующим осаждением покрытий, среди которых особый интерес представляют процессы, реализуемые с использованием тлеющего разряда с эффектом полого катода.

Степень разработанности. Существенный вклад в разработку теории и практического применения тлеющего разряда с электростатическим удержанием электронов внес А.С. Метель. Им были определены механизм тлеющего разряда с электростатическим удержанием электронов, физическая сущность эффекта электростатической ловушки, разработана теория и выявлены области диапазона давления и катодного падения потенциала, в котором тлеющий разряд с электростатическим удержанием электронов существенно отличается от разряда без удержания электронов, а также выполнена разработка на основе полученных результатов устройств и установок для обработки изделий плазмой и пучками ускоренных частиц. Дальнейшее практическое развитие технологического оборудования, базирующегося на эффекте полого катода в тлеющем разряде применительно к технологиям физического осаждения вакуумно-плазменных покрытий, было реализовано Ю.И. Бубликовым, а предложенная им концепция использовалась в настоящей работе.

Значительный вклад создание теоретических основ и практического применения методов осаждения вакуумно-плазменных покрытий различного функционального назначения внесли российские и зарубежные ученые – Верещака А.С., Табаков В.П., Григорьев С.Н., Кабалдин Ю.Г., Верещака А.А., Внуков Ю.Н., Klocke F., Vetter J., Fox-Rabinovich G.S., Voxman R., Goldsmith S., Kumar C.S., Bouzakis K.-D., Yamamoto K., Veldhuis S.C., Kovalev A.I., Beake B.D., Veprek S. и ряд других. Их работы раскрывают механизмы процессов осаждения покрытий и специфические особенности их изнашивания при эксплуатации в широком диапазоне действующих нагрузок. На основе всестороннего анализа предшествующих работ были показаны направления и перспективы дальнейшего повышения функциональных свойств изделий с вакуумно-плазменными покрытиями посредством применения усовершенствованных процессов и оборудования для вакуумно-дугового осаждения. Несмотря на значительный объем имеющихся исследований и достигнутые результаты, ряд ключевых аспектов процессов предварительной обработки (подготовки) поверхности с использованием плазмы тлеющего разряда перед осаждением покрытий и ее влияние на функциональные свойства вакуумно-плазменных покрытий, формируемых на различных субстратах (материалах основы), остаются недостаточно изученными с учетом современных задач и уровня развития науки. В частности, малоизученными являются вопросы влияния параметров процессов очистки и термоактивации на структуру поверхностных слоев субстратов из различных материалов, характеристики интерфейса «покрытие – субстрат» и функциональные свойства изделий с покрытиями.

Цель работы – 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.

Объектом исследований являются функциональные свойства образцов из различных материалов (твердого сплава, титанового и алюминиевого сплавов, нержавеющей стали) с вакуумно-плазменными покрытиями.

Предметом исследования являются процессы подготовки (очистки и термоактивации) образцов из различных материалов в плазме тлеющего разряда с удержанием плазмы прикатодным потенциалом (эффект полого катода).

Для достижения поставленной цели работы необходимо решить следующие **задачи**:

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.

Методы исследования. Работа выполнена на основе использования фундаментальных положений теории резания материалов и физики твердого тела, методов статистического анализа результатов экспериментальных исследований. Изучение механизмов влияния параметров процессов очистки и термоактивации поверхности при осаждении износостойких покрытий на свойства внешних слоев субстрата и параметров интерфейса «субстрат – покрытие» выполняли с использованием современных методов металлографического и металлофизического анализов с применением вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС), энергодисперсионной спектрометрии (ЭДС), сканирующей электронной (СЭМ) и просвечивающей (ПЭМ) микроскопии.

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.

Теоретическая значимость работы заключается в установленных закономерностях 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; в выявленном влиянии свойств материала субстрата и параметров процесса очистки и термоактивации плазмой тлеющего разряда с реализацией

эффекта полого катода на состояние поверхностного слоя и прочность интерфейса между субстратом и осаждаемыми покрытиями.

Практическая значимость работы заключается в следующем.

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, использование которой для осаждения покрытий на твердосплавном режущем инструменте, изготавливаемом АО «Резьбовые Технологии», позволило повысить производительность обработки резьб на деталях из труднообрабатываемых сталей на 25–30 %.

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.

Основные положения, выносимые на защиту:

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.

Достоверность полученных результатов. Достоверность выводов и положений диссертационной работы подтверждается большим количеством непротиворечивых и повторяемых результатов экспериментальных исследований, полученных с использованием современного оборудования и аттестованных методик, а также применением статистических методов обработки полученных данных.

Личный вклад автора. Диссертация является научно-исследовательской работой, в которой обобщены результаты исследований, полученные лично автором и в соавторстве. Автору работы принадлежит основная роль в постановке

задач, получении и обработке экспериментальных данных, анализе и обобщении полученных результатов. Основные положения и выводы диссертационной работы сформулированы и обоснованы лично автором.

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).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа представляет собой научное обоснование новых технических решений и средств реализации процессов физико-технической обработки поверхностей ответственных изделий, включая процессы вакуумно-плазменной обработки с наложением физических воздействий. Изучение связей и закономерностей в указанной области осуществляется для совершенствования технологий и определения оптимальных параметров поверхностной обработки образцов из различных материалов (твердого сплава, титановых и алюминиевых сплавов, нержавеющей стали), обеспечивающих повышение производительности и качества обработки, а также улучшение функциональных свойств изделий при эксплуатации. По теме и содержанию материалов диссертационная работа соответствует научной специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» в части п. 2 и п. 3 раздела «Области исследований» её паспорта.

Публикации. 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.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем работы: основной текст содержит 127 страниц, включая 59 рисунков и 5 таблиц; список литературы включает 107 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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.

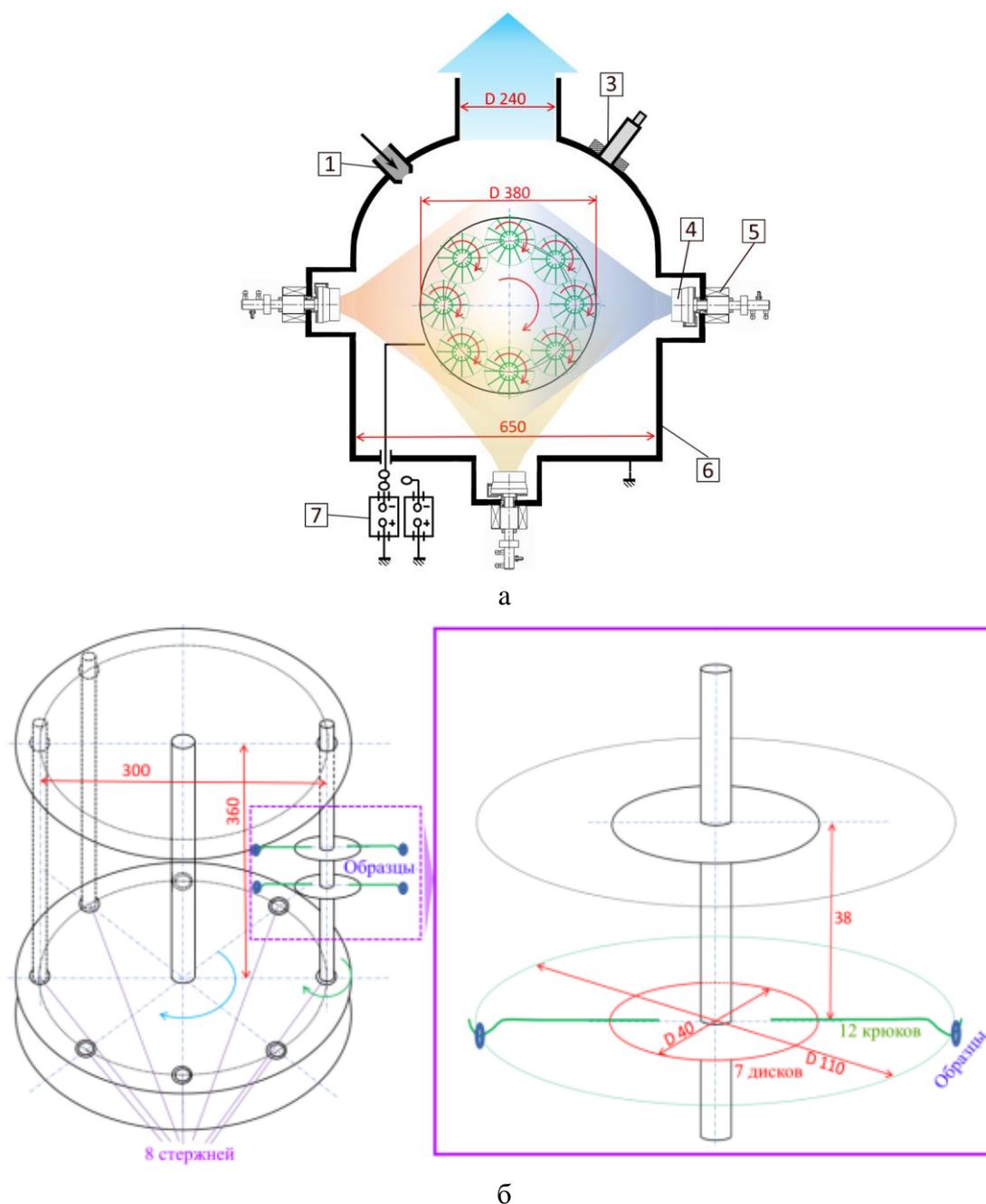


Рис. 1. Общая схема установки ВИТ-2 (а) и пространственная схема поворотного стола с оснасткой, схема расположения образцов на стойке оснастки (б)

Во второй главе содержится описание методики проведения исследований. Для осаждения изучаемых покрытий применялась специальная исследовательская установка ВИТ-2 (рис. 1). В данной установке используются два типа испарителей: система *filtered cathodic vacuum arc deposition* (FCVAD), позволяющая обеспечить до 98 % сепарации фазы микрочастиц в сочетании с обеспечением высокой степени фокусировки потока плазмы. Испарители второго типа – системы *Controlled Accelerated Arc* (CAA-PVD) отличаются высокой энергетической эффективностью и сниженным по отношению к традиционным испарителям дугового типа количеством микрочастиц. Катод Al (99,8 %) устанавливался в систему FCVAD, так как именно Al дает максимальное количество микрочастиц и, соответственно, существует необходимость в их эффективной сепарации. Катоды Ti (99,6 %) и Cr (99,9 %) устанавливались на испарители системы CAA-PVD. Перед установкой на специализированную оснастку и помещением в камеру образцы проходили процедуру подготовки. Данная процедура включала мойку в специальном растворе при высокой температуре с ультразвуковой стимуляцией, мойку в специально очищенной воде, сушку в потоке очищенного воздуха.

Давление рабочего газа в камере поддерживалось на разных этапах в пределах 1–10 Па. Напряжение на субстрате от 300 до 1500 В.

В вакуумную камеру по цилиндрической образующей поворотного стола помещалось 600 образцов для имитации ее полной загрузки. Образцы представляли собой восьмигранные пластины из металла $13,0 \times 6,6$ мм с отверстием диаметром 6,5 мм. Вес отдельного образца составлял 4,4 г. Общий вес напыляемых образцов равнялся примерно 3 кг. Эти образцы имитировали полную загрузку камеры твердосплавными пластинами для коммерческого процесса осаждения покрытий.

В настоящей работе проведено сравнения свойств покрытий при использовании двух различных методов очистки и термоактивации поверхности: ионная бомбардировка (в дальнейшем обозначается, как IB) и тлеющий разряд с частичной реализацией эффекта полого катода (в дальнейшем обозначается, как HCM(GD)).

Процесс нанесения покрытия с предварительным травлением ионами металлов (IB) плазмы генерируемыми вакуумными испарителями. По окончании загрузки проводилась откачка вакуумной камеры. После достижения давления в камере 10^{-3} Па проводилась последовательная продувка камеры рабочими газами с последующей откачкой. Ионная очистка и нагрев изделий осуществлялась при давлении не выше 10^{-2} Па в плазме, генерируемой дуговыми испарителями с установленными на них титановым и хромовым катодами. В начале процесса во избежание появления микродуг на поворотный стол подавался отрицательный потенциал 100 В. По мере очистки и нагрева деталей для достижения требуемой температуры 650–700 °С отрицательный потенциал постепенно повышался до 1000 В и более. При достижении заданной температуры деталей дуговым испарителем осаждался адгезионный субслой титана в течении 3 мин. Ток дуги титанового катода при этом составлял 80 А, а отрицательное напряжение на деталях снижалось до 160 В. Затем в вакуумную камеру подавался технологический газ (азот) до давления 0,6 Па и наносился слой нитрида титана в течении 15 мин. Для последующего нанесения слоя (Ti,Cr,Al)N дополнительно включались дуговые испарители с хромовым катодом и с алюминиевым катодом, расположенным в

сепараторе. Ток дуги испарителя с хромовым катодом составлял – 80 А, а испарителя с алюминиевым катодом – 160 А. Осаждение проводилось в течение 30 мин. при температуре около 480 °С. Температура изделий регулировалась величиной опорного напряжения поворотного стола.

Для обеспечения необходимых свойств покрытий при реализации метода НСМ изделия размещаются в вакуумной камере в соответствии с технологическими требованиями. В частности, расстояние между покрываемыми деталями должно быть не менее нескольких сантиметров. Сами детали могут иметь физический размер от нескольких миллиметров и более. Таких деталей может быть несколько сотен и даже тысяч. Размещаются они на стойках поворотного стола для обеспечения равномерности покрытия на всех рабочих поверхностях. При этом всегда можно выделить часть деталей, которые образуют своими поверхностями некоторую квазиполость. Например, режущие пластины, размещенные на стойке на нескольких ярусах на одинаковом расстоянии от оси, своими внутренними поверхностями образуют часть цилиндрической поверхности. Суммарная площадь всех пластин, составляющих эту поверхность значительно меньше площади теоретической поверхности цилиндра. В такой квазиполости эффект тлеющего разряда в полном катоде незначителен, так как площадь поверхности, от которой заряды могут оттолкнуться и остаться внутри, намного меньше площади, через которую они могут ее покинуть. Однако если длина прикатодного падения потенциала тлеющего разряда, т.е. область высокой напряженности электрического поля у поверхности катода, сравнима с расстояниями между деталями, то это электростатическое поле также препятствует выходу зарядов из рассматриваемой области. Не все заряженные частицы смогут преодолеть это поле и покинуть квазиполость через пространство между деталями. Положительно заряженные ионы притягиваются к катоду (деталю под отрицательным напряжением), а электроны отталкиваются обратно. Таким образом, электростатическое поле тлеющего разряда удерживает заряженные частицы внутри квазиполости. В итоге заряды запираются в квазиполости не только физическими поверхностями катода, но и прикатодным электростатическим полем самого тлеющего разряда. Чем больше длина прикатодного падения потенциала, тем сильнее этот эффект запираения зарядов в квазиполости. Полость катода в таком случае создается не только реальными физическими поверхностями, но и электрическим полем у поверхностей частей катода, как бы создавая дополнительную площадь покрытия области (электростатическая полость тлеющего разряда). В такой полости, при дополнительном запираении зарядов прикатодным электрическим полем, эффект тлеющего разряда в полном катоде значительно возрастает и становится настолько сильным, что его можно использовать в процессе PVD для нагрева и ионной очистки деталей до необходимых температур в соответствии с требованиями технологического процесса без какого-либо дополнительного оборудования (инфракрасные нагреватели, дуговые испарители, специализированные ионные источники и др.). При этом имеется возможность управлять процессами травления и нагрева в широком диапазоне параметров. Эффект запираения зарядов прикатодным электрическим полем играет существенную роль в образовании таких квазиполостей только в том случае, если длина темного пространства тлеющего разряда сравнима с расстояниями между деталями. Это имеет место при вакууме от

1 до 13 Па. В тлеющем разряде без использования этого эффекта невозможно достичь температур выше 300 °С в данном диапазоне давлений. Температура же покрываемых поверхностей, необходимая для нанесения PVD покрытий должна быть выше 600 °С, что может быть легко получено в промышленных установках с применением НСМ метода.

Температура деталей в процессе нагрева измерялась бесконтактным методом с помощью Infrared Thermometer IRCON Module3.

Исследование характера генерации плазмы тлеющего разряда в полой катодной с удержанием плазмы прикатодным электрическим полем. На рис. 2 представлено фото тлеющего разряда для катода, состоящего из шести металлических стержней диаметра 20 мм, расположенных по окружности диаметра 110 мм, на одинаковых расстояниях друг от друга (примерно 25 мм) при тех же давлениях.

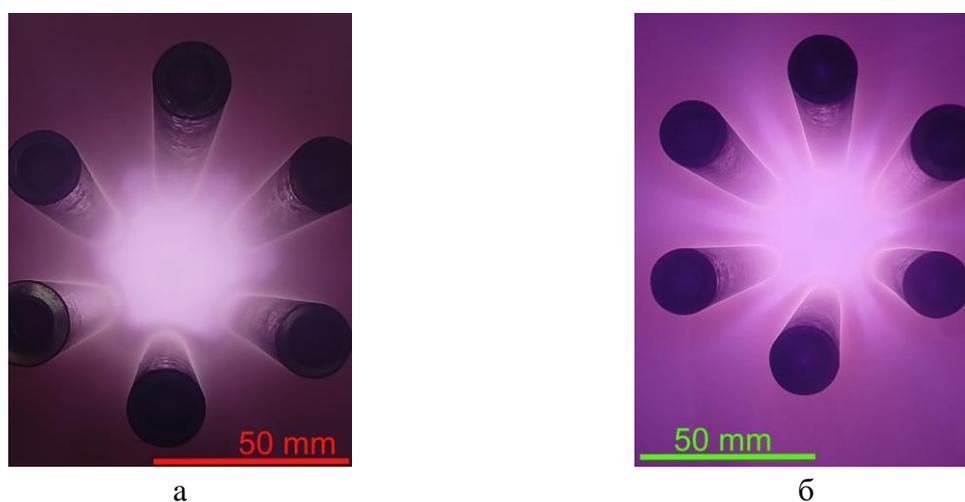


Рис. 2. Тлеющий разряд для катода, состоящего из шести металлических стержней, расположенных вертикально при давлении 2,5 Па (а) и 12 Па (б)

По интенсивности свечения хорошо видно, что во внутренней полости, образованной поверхностями стержней, интенсивность свечения значительно выше, чем вне этой полости. Здесь имеет место эффект полого катода. Сильное электрическое поле в области катодного темного пространства, как описано выше, препятствует выходу заряженных частиц из полости, что усиливает эффект полого катода. Такую полость, образованную физическими поверхностями с дополнительным запираем заряженных частиц электрическим полем темного катодного пространства разряда, будем называть дальше квазиполостью. Чем больше ширина темного пространства, тем сильнее эффект запираем заряженных частиц и тем больше проявляется эффект полого катода. Также, чем больше протяженность темного катодного пространства, тем больше расстояние между частями катода, при котором начинает проявления эффект полого катода. При этом геометрическая площадь частей катода может быть значительно меньше площади запираем полости электрическим полем.

Характерный размер темного катодного пространства такой же, как и характерные геометрические размеры образцов и расстояний между ними, только в диапазоне давлений примерно от 1 до 13 Па. В связи с этим проявление эффекта

полого катода за счет запираания заряженных частиц электрическим полем существенно только в данном диапазоне давлений. Квазиполость как бы дополнительно закрыта электрическим полем. При более высоких давлениях квазиполость образуют только физические границы поверхностей катода. Без эффекта дополнительного запираания электрическим полем электронов площади геометрической поверхности образцов квазиполости слишком мало для проявления эффекта полого катода.

В PVD технологиях нанесения покрытия количество напыляемых деталей может быть весьма значительным и достигать нескольких сотен. Все они, а также все элементы механизма планетарного вращения, находятся под отрицательным напряжением, которое подается от высоковольтного источника питания. В результате при возбуждении самостоятельного тлеющего разряда катод имеет сложную геометрическую форму, в дальнейшем называемый метакатодом.

Скорость и равномерность нагрева деталей. На рис. 3а представлена фотография нагретых методом НСМ образцов. По цвету образцов можно визуальнo судить о температуре их поверхности, а также о равномерности их нагрева в разных участках вакуумной камеры по высоте. Очевидно, 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. Для сравнения на рис. 3б представлен вид аналогичных образцов, нагретых с использованием дисковых дуговых источников. Видна существенная неравномерность нагрева по высоте вверх и вниз от оси дугового источника. Температура в центре (напротив дугового источника) превышает 670 °С в то время, как расположенные в верхней и нижней позициях образцы нагреты до температуры не более 530–550 °С.

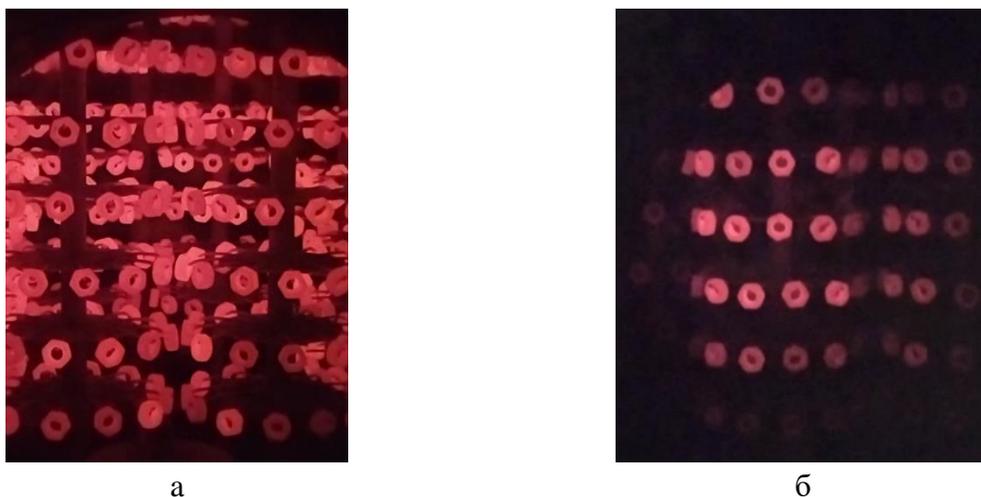


Рис. 3. Визуальный эффект от нагрева образцов: а – тлеющим разрядом с частичной реализацией эффекта полого катода; б – с использованием дисковых дуговых источников

На рис. 4 представлены зависимости 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 течении нескольких

минут. Скорость нагрева существенно зависит от давления в вакуумной камере и от напряжения на подложке. Зависимость температуры от времени нагрева для каждого из рассматриваемых сочетаний параметров (давление и напряжение смещения) с высокой степенью достоверности аппроксимации ($R^2 = 0,998-0,999$) описывается полиномами третьей степени.

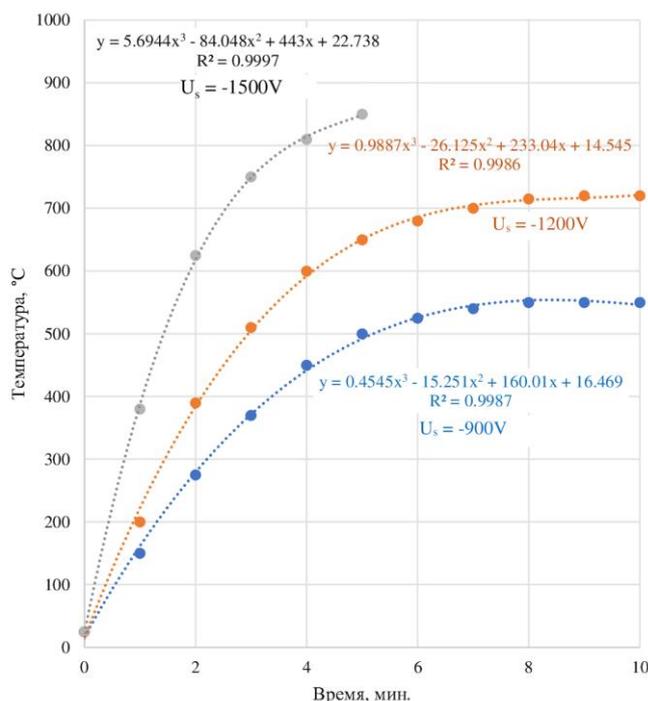


Рис 4. Зависимости температуры поверхности образцов от времени нагрева методом НСМ при различных параметрах процесса

Предварительная обработка поверхности субстрата методами ионной бомбардировки (ИБ) оказывает заметное влияние на состояние поверхностного слоя (рис. 5). Формируется слой толщиной порядка 50 нм, идентичный по составу, но отличающийся по структуре от более глубоких слоев субстрата. Наблюдается также 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 (рис. 6а). Исследование распределения элементов в данных слоях показывает, что темный по контрасту слой (точка 3 на рис. 6б), толщиной порядка 20 нм, имеет достаточно высокое содержание кобальта. В данном слое также наблюдается присутствие железа и достаточно высокое содержание хрома и алюминия при сниженном относительно соседних слоев содержании титана. Непосредственно к субстрату прилегает светлый по контрасту слой с высоким содержанием титана, а также содержащий кобальт, хром и алюминий. Исследовании другой области интерфейса (рис. 6в) также показывает чередование слоев с высоким содержанием кобальта и титана, однако в данном случае они менее дифференцированы по контрасту. В слое, прилегающем к субстрату (точка 3 на рис. 6в), наблюдается также заметная диффузия вольфрама. В обоих рассматриваемых случаях имеет место диффузия хрома в субстрат на глубину до 200 нм.

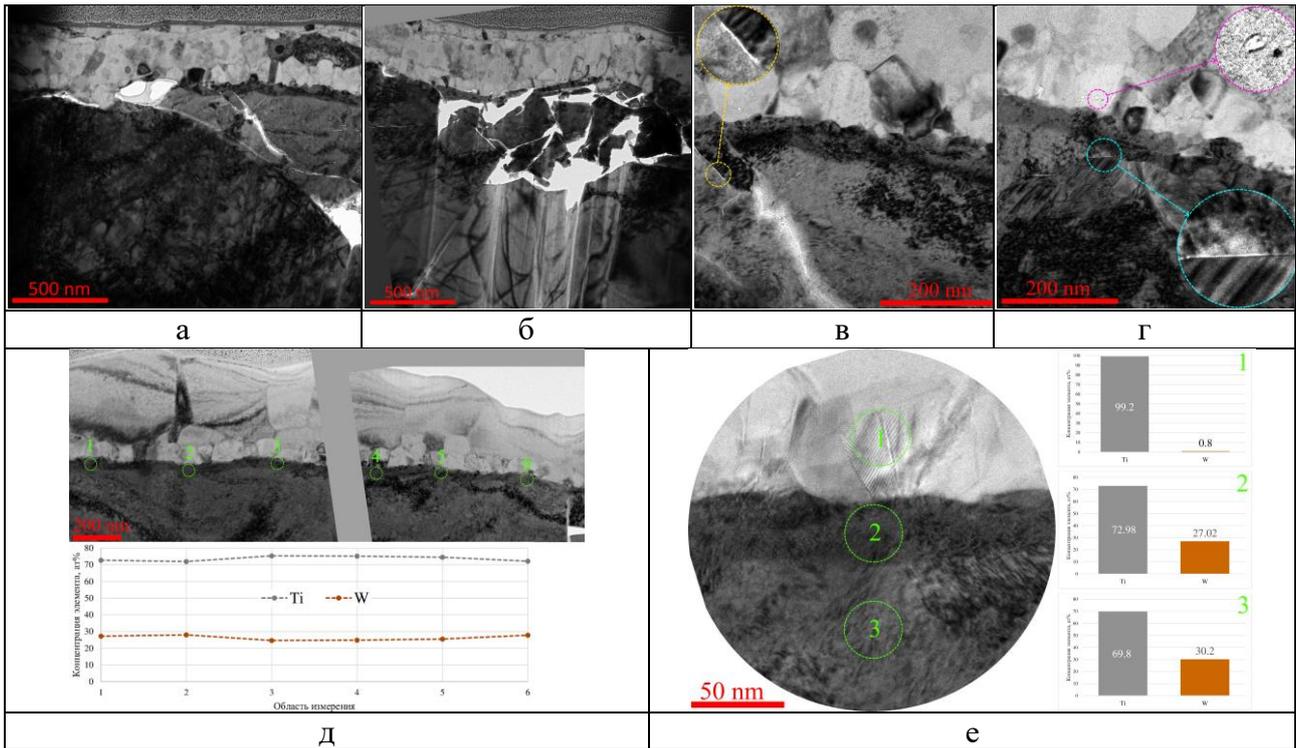


Рис. 5. Влияние очистки методами ионной бомбардировки (ИБ) на состояние поверхностного слоя твердосплавного субстрата

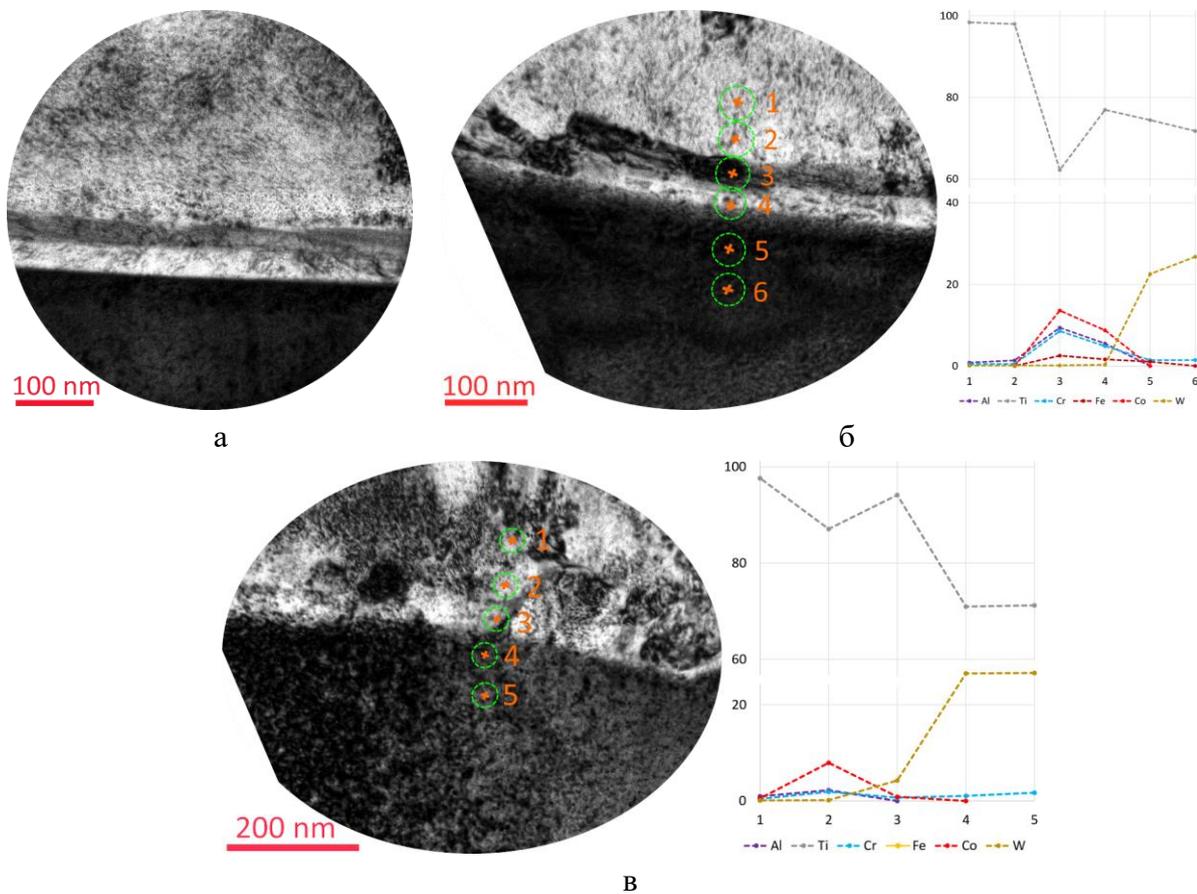


Рис. 6. Исследование области интерфейса между субстратом и покрытием при ИВ: а – слоистое строение области интерфейса; б, в – анализ содержания химических элементов

Для подтверждения обнаруженных закономерностей провели анализ ламеллы, вырезанной из другого образца (рис. 7). Общей закономерностью является наличие слоя с высоким содержанием кобальта (в некоторых случаях – выше 40 ат.%, рис. 7г). В большинстве случаев присутствует непосредственно прилегающий к поверхности субстрата слой с высоким содержанием титана (80–98 ат. %, рис. 7а,г,д). В двух случаях (рис. 7б,в) такой слой не наблюдается, непосредственно к субстрату примыкает слой с высоким содержанием кобальта. В одном случае (рис. 7г) между слоями с высоким содержанием титана и кобальта формируется слой с достаточно высоким (до 19 ат.%) содержанием хрома. В указанном слое наблюдается также высокое содержание алюминия и молибдена. Присутствие железа в незначительных количествах в слое, богатом кобальтом, наблюдается на рис. 7г (точка 6) и 7е (точка 5).

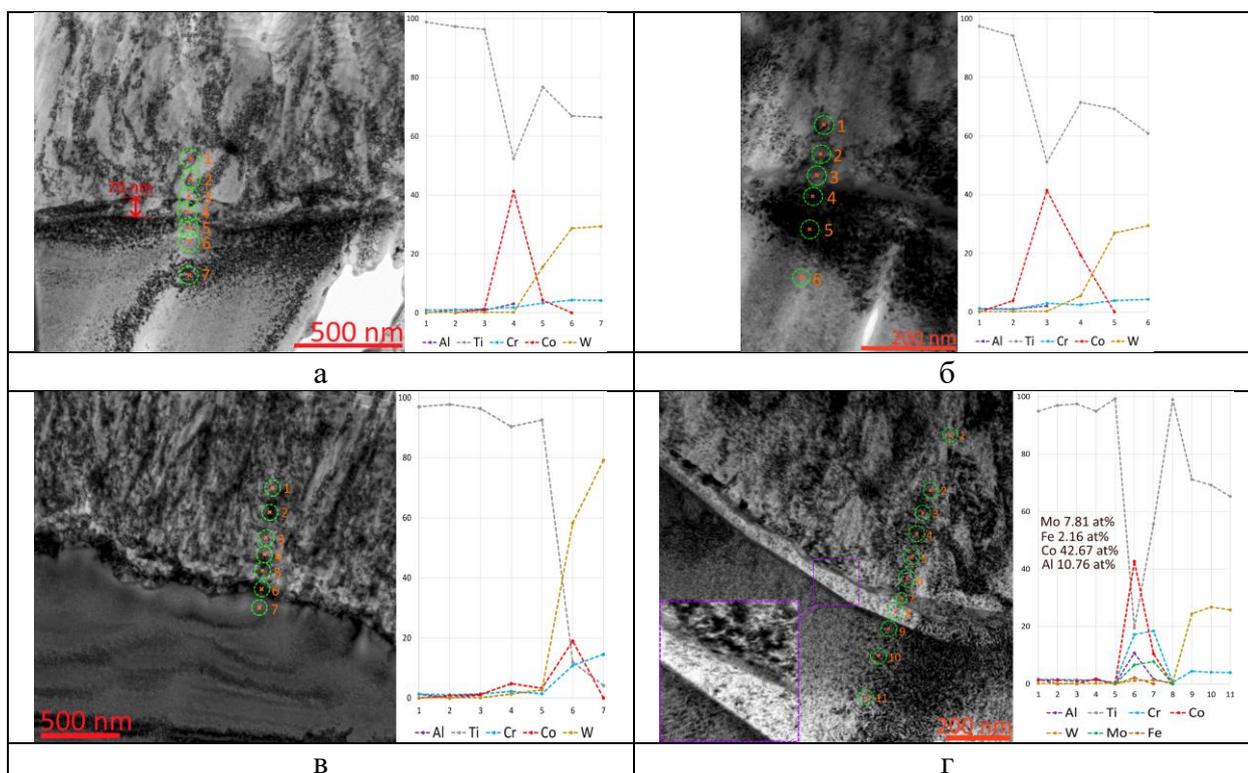


Рис. 7. Анализ содержания химических элементов в области интерфейса между покрытием и субстратом при ИВ

Формирование слоистой структуры, включающей слой практически чистого титана и слой с высоким содержанием кобальта и возможным включением некоторых дополнительных элементов (например, железа), которые отсутствуют как в составе покрытия, так и в составе субстрата, требует некоторого обсуждения. Ранее было установлено, что ионное травление инертным газом приводит к более быстрому удалению карбидов, чем кобальтовой матрицы. Напротив, травление ионами металлов обеспечивает эффект активного распыления кобальтовой связки.

В процессе ионной бомбардировки с генерацией плазмы дуговыми испарителями на границе покрытия и субстрата формируется слой сложного строения и состава, который может включать:

- диффузионный слой в субстрате (толщиной до 200 нм). Наблюдается диффузия Cr и, возможно, Ti (идентификация диффузии титана затруднена в связи с его присутствием также в составе субстрата – TiC);
- слой с доминирующим содержанием титана (толщиной 30–50 нм);
- слой с высоким содержанием кобальта и возможным присутствием элементов из оснастки (в частности, железа и молибдена). Состав данного слоя практически невозможно контролировать.

Рассмотрим структуру и состав слоя, сформировавшегося при нагреве поверхности субстрата тлеющим разрядом с частичной реализацией эффекта полого катода. Интерфейс покрытия и субстрата также имеет слоистую структуру (рис. 8а). При этом слой с высоким содержанием кобальта отсутствует, в некоторых областях наблюдается присутствие кобальта в крайне незначительных количествах. Также наблюдается незначительное присутствие железа и молибдена, на их содержание существенно ниже, чем наблюдалось при исследовании покрытий IV. В некоторых случаях (рис. 8б,г) имеет место диффузия вольфрама в прилегающий к субстрату слой с высоким содержанием титана.

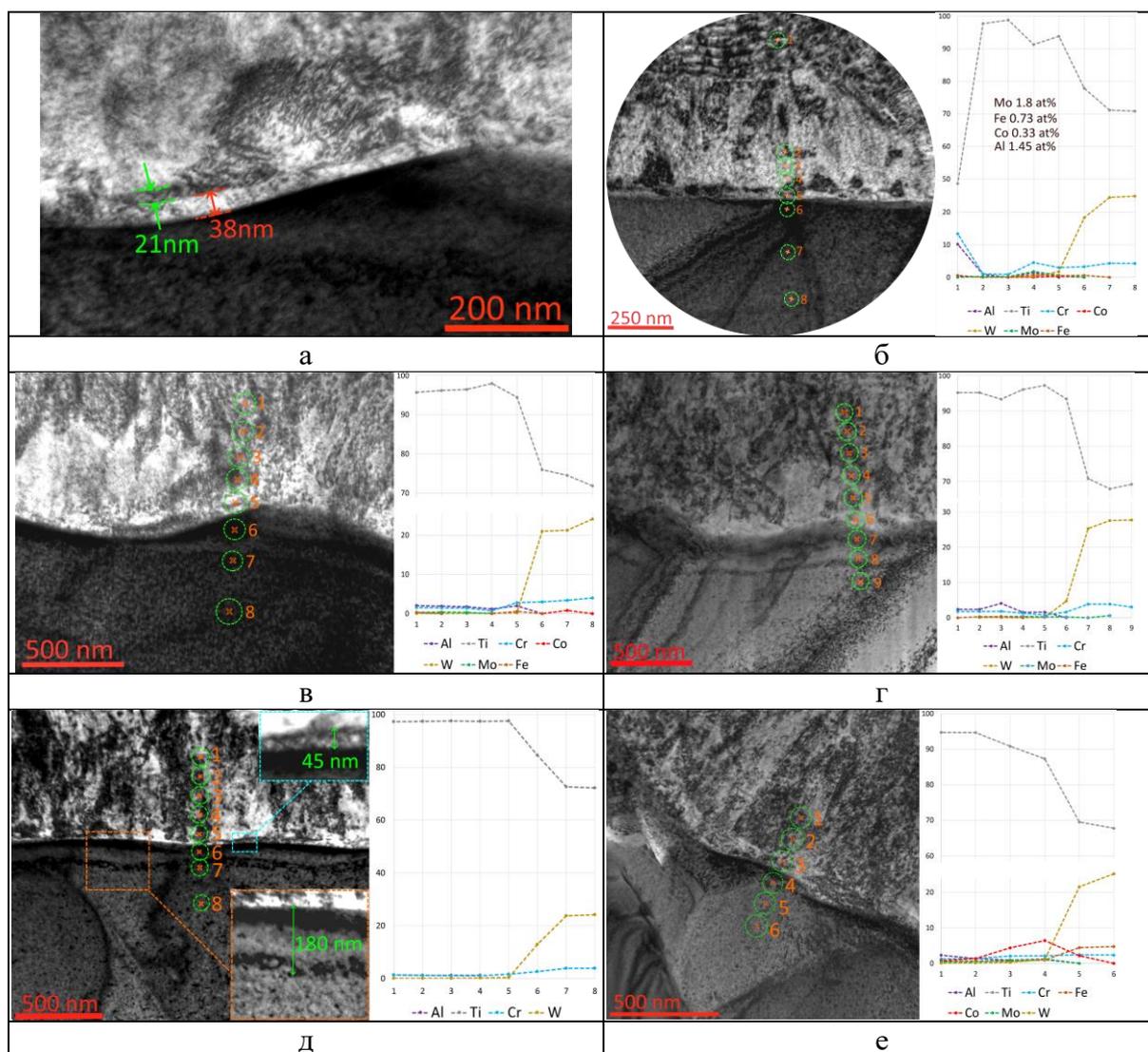


Рис. 8. Исследование области интерфейса между субстратом и покрытием при НСМ: а – слоистое строение области интерфейса; б-е – анализ содержания химических элементов

Для определения рационального значения величины напряжения смещения на субстрате (U_s) при нагреве и травлении образцов тлеющим разрядом с частичной реализацией эффекта полого катода были изготовлены три партии образцов, обработанных при различных значениях величины U_s (табл. 1).

Таблица 1. Параметры проведения эксперимента

Обозначение покрытия	НСМ 1	НСМ 2	НСМ 3
Напряжение смещения на субстрате (U_s)	-900 В	-1200 В	-1500 В

Результаты исследования режущих свойств при точении стали 45 показывают, что при скорости резания $V_c = 300$ м/мин инструмент с покрытием НСМ показывает несколько менее активную динамику изнашивания по сравнению с инструментом с покрытием ИВ (рис. 9). При повышении скорости резания до $V_c = 350$ 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 ($h_{3\max} = 350$ мкм), при этом инструмент с покрытием по технологии НСМ сохраняет работоспособность и не достиг предельного значения износа. Так как при повышении скорости резания в первую очередь повышается температура, можно предположить, что покрытие НСМ имеет лучшую теплостойкость по сравнению с покрытием ИВ. Но так как параметры осаждения покрытий полностью идентичны, за исключением стадии очистки и термоактивации, можно предположить, что покрытие лучше сохраняет адгезию с субстратом в условиях высокой температуры.

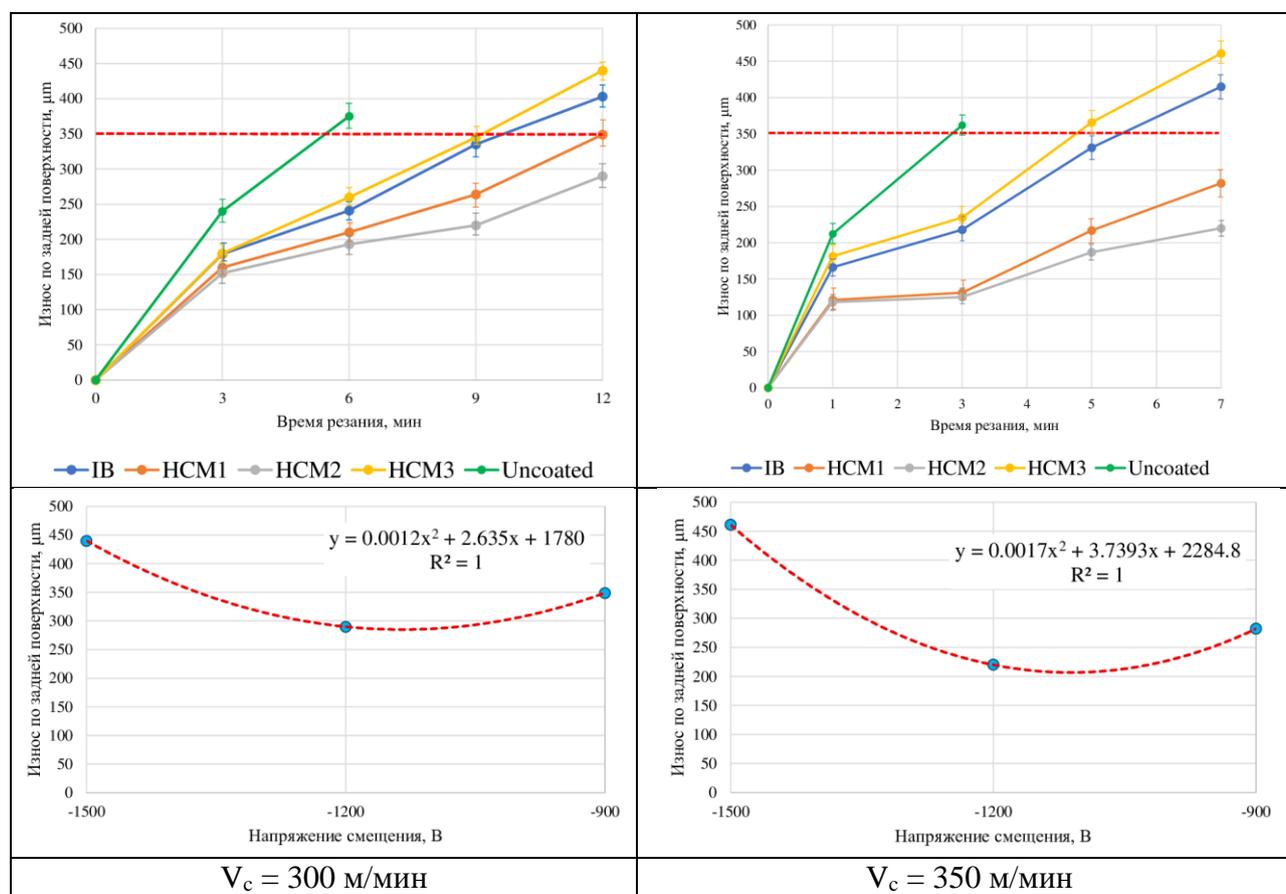


Рис. 9. Результаты исследования режущих свойств инструментов при точении стали 45 ($v = 300$ и 350 м/мин; $t = 2$ мм; $s = 0,3$ мм/об; $\gamma = -7^\circ$; $\alpha = 7^\circ$; $\lambda = 0$;
Субстрат: Н20 (аналог Т15К6); SNUN120304 ($S = 3.18$ мм, $L = 12.70$ мм, $r = 0.4$ мм))

Определение рационального значения величины напряжения смещения на субстрате. Уравнение $f'_0(x_i) = 0$ – это необходимое условие экстремума функции одной переменной, т.е. в точке x_i первая производная функции должна обращаться в нуль. Оно выделяет стационарные точки x_c , в которых функция не возрастает и не убывает. Пусть $f_0(x)$ дважды дифференцируемая по x , принадлежащему множеству D . Если в точке x_i выполняется условие:

$$\begin{aligned} f'_0(x_i) &= 0 \\ f''_0(x_i) &> 0 \end{aligned}$$

то точка x_i является точкой локального (глобального) минимума функции.

Если в точке x_i выполняется условие:

$$\begin{aligned} f'_0(x_i) &= 0 \\ f''_0(x_i) &< 0 \end{aligned}$$

то точка x_i – локальный (глобальный) максимум.

При $V = 300$ м/мин $y = 0,0012x^2 + 2,635x + 1780$

Находим первую производную функции: $y' = 0,0024 \cdot x + 2,635$

Приравниваем ее к нулю: $0,0024 \cdot x + 2,635 = 0$

$$x_1 = -1097,917$$

Вычисляем значения функции. $f(-1097,917) = 333,495$

Используем достаточное условие экстремума функции одной переменной.

Найдем вторую производную: $y'' = 0,0024000000000000$.

Вычисляем: $f''(-1097,917) = 0,0024 > 0$ – значит эта точка минимума функции.

При $V = 350$ м/мин $y = 0,0017x^2 + 3,7393x + 2284,8$

Находим первую производную функции: $y' = 0,0034 \cdot x + 3,7393$

Приравниваем ее к нулю: $0,0034 \cdot x + 3,7393 = 0$

$$x_1 = -1099,794$$

Вычисляем значения функции. $f(-1099,794) = 228,57$

Используем достаточное условие экстремума функции одной переменной.

Найдем вторую производную: $y'' = 0,0034000000000000$

Вычисляем: $f''(-1099,794) = 0,0034 > 0$ – значит эта точка минимума функции.

Таким образом, рациональная величина напряжения смещения субстрата с точки зрения обеспечения максимальной износостойкости при точении составляет порядка -1100 В и практически не зависит от скорости резания в исследуемых диапазонах.

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. В частности, пластины АРМТ1604-Н2 с покрытием (Zr,Hf,Al)N НСМ обеспечили при фрезеровании титанового сплава ТС4 (Ti-6Al-4V) при $v = 70$ м/мин, $s = 0,2$ мм/об, $t = 0,1$ мм износостойкость, эквивалентную износостойкости аналогичных пластин с покрытием на основе нитрида циркония (Kehui), предлагаемым фирмой Jiangsu Tiangong Cemented Carbide Technology Co., Ltd для фрезерования материалов данной группы обрабатываемости.

При фрезеровании жаропрочного сплава GH4169 (Ni – 50...55 %, Cr – 17...21 %, Nb – 4,75...5,50 %, Mo – 2,8...3,3 %) с использованием твердосплавных пластин

АРМТ1604-Н2 с покрытием (Ti,Al,Cr)N НСМ с режимами резания $v = 35$ м/мин, $s = 0,2$ мм/об, $t = 0,15$ мм износостойкость оказалась выше, чем у аналогичных пластин с покрытием (Ti,Si)NO, рекомендованным Jiangsu Tiangong Cemented Carbide Technology Co., Ltd для фрезерования материалов данной группы обрабатываемости. При этом пластины с покрытиями (Zr,Hf,Al)N IB и (Ti,Al,Cr)N IB показали износостойкость заметно ниже, как по сравнению с пластинами с покрытиями НСМ, так и по сравнению с пластинами с покрытиями Jiangsu Tiangong Cemented Carbide Technology Co., Ltd.

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 (IB) и тлеющего разряда (НСМ). Сравнивались покрытия НСМ, осажденные при различных величинах U_s (см. табл. 1).

Результаты исследования износостойкости образцов с различными параметрами процесса НСМ при тесте штифт-по диску представлены на рис. 10. Изменение величины напряжения смещения оказывает заметное влияние на сопротивляемость изнашиванию. В некоторых случаях износостойкость образцов с НСМ оказывается даже ниже, чем у образца с IB. При этом для всех трех материалов субстрата наилучшая сопротивляемость изнашиванию наблюдается у образца НСМ 2.

Получив аппроксимирующую функцию для каждого из субстратов, определим оптимальное значение величины напряжения смещения. Для этого определим точку экстремума функции. В нашем случае это точка области определения функции, в которой значение функции принимает минимальное значение (величина износа минимальна). Задача поиска экстремума функции предполагает нахождение производной функции, определение точки, в которой производная равна нулю (или не существует, если функция имеет разрыв) и проверку того, меняется ли знак производной в этой точке. Смена знака производной указывает на наличие минимума функции.

Нержавеющая сталь: $y = 0,0005x^2 + 1,2122x + 906,13$

Находим первую производную функции: $y' = 0,001 \cdot x + 1,2122$, Приравняем ее к нулю: $0,001 \cdot x + 1,2122 = 0$. $x_1 = -1212,200$ (В).

Алюминиевый сплав: $y = 0,0008 \cdot x^2 + 1,6642 \cdot x + 1133,4$

Находим первую производную функции: $y' = 0,0016 \cdot x + 1,6642$, Приравняем ее к нулю: $0,0016 \cdot x + 1,6642 = 0$. $x_1 = -1040,125$ (В)

Титановый сплав: $y = 0,0004x^2 + 0,9012x + 640,43$

Находим первую производную функции: $y' = 0,0008 \cdot x + 0,9012$. Приравняем ее к нулю: $0,0008 \cdot x + 0,9012 = 0$. $x_1 = -1126,500$ (В)

Таким образом, отклонение расчетных рациональных значений от используемого в экспериментах значения -1200 В составило, соответственно, 1,01 %, 13,30 % и 6,12 %. При этом максимальное отклонение наблюдается у образцов из алюминиевого сплава, для которых характерен также существенный

разброс значений величины износа. Таким образом, оптимальное значение напряжение смещения для субстратов из нержавеющей стали, алюминиевого и титанового сплава составляет, соответственно, -1212 , -1040 и -1126 В.

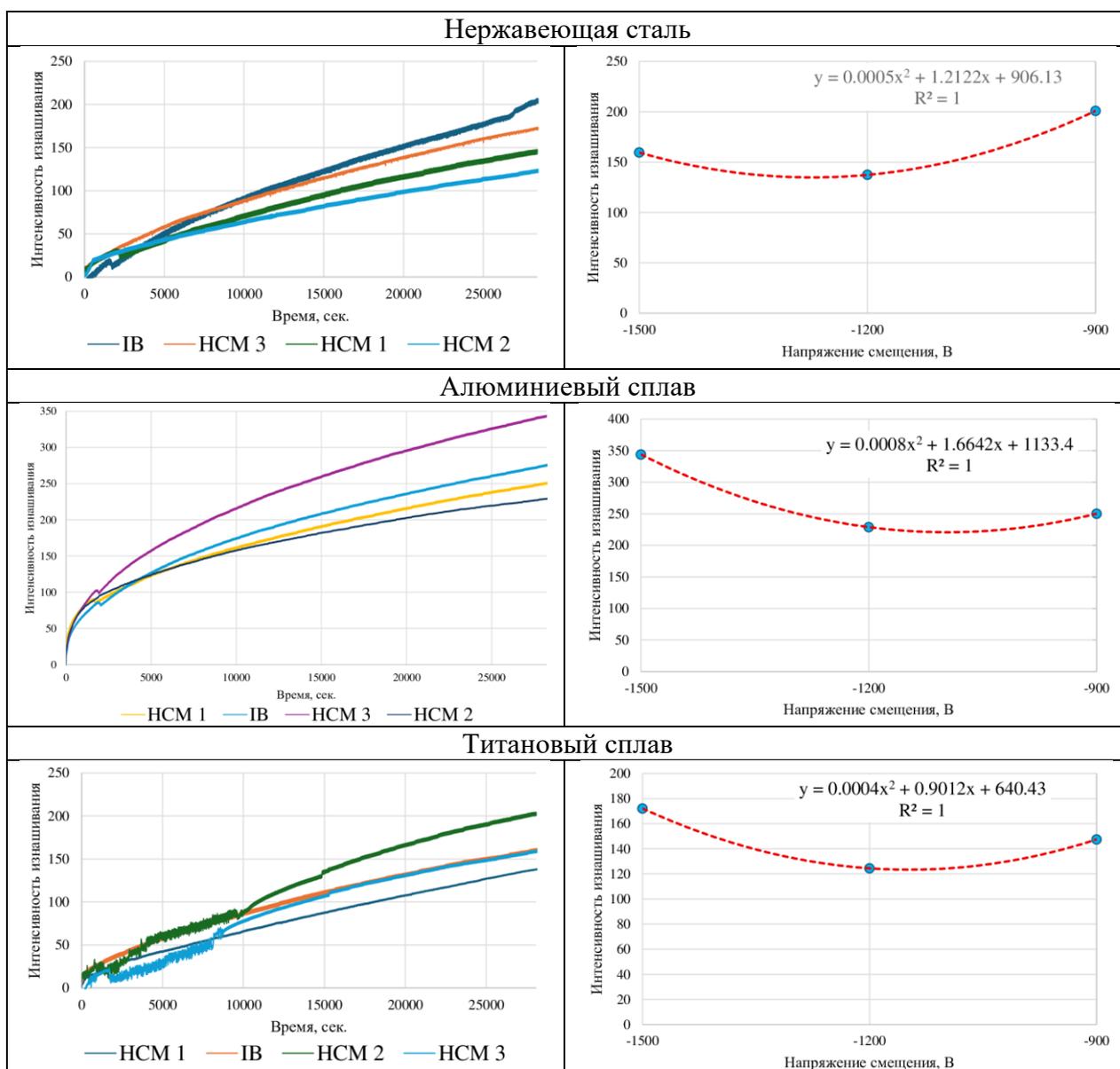


Рис. 10. Результаты исследования износостойкости (pin-on-disk) образцов из титанового сплава, нержавеющей стали и алюминиевого сплава, подготовленных с использованием методов IB и HSM

Оптимальная величины напряжения смещения на субстрате зависит от такого свойства материала субстрата, как теплопроводность (рис. 11а). Чем выше величина теплопроводности материала, тем ниже оптимальная величина напряжения смещения. При этом влияние электропроводности менее очевидно (рис. 11б). Электропроводность титанового сплава ниже, чем у нержавеющей стали, однако оптимальная величина напряжения смещения при этом выше. В процессе ионной обработки необходимо добиться с одной стороны достаточный уровень очистки без чрезмерного растравливание поверхности и с другой – достичь требуемой равновесной температуры изделия. Нижний порог температуры определяется полнотой протекания

химических реакций для получения необходимого стехиометрического состава покрытий, а также началом термодиффузных процессов материала покрытия основу. Верхний порог определяется структурными и фазовыми изменениями материала основы. Диапазон необходимой равновесной температуры обеспечивается параметрами ионной обработки, т.е. параметрами газового разряда.

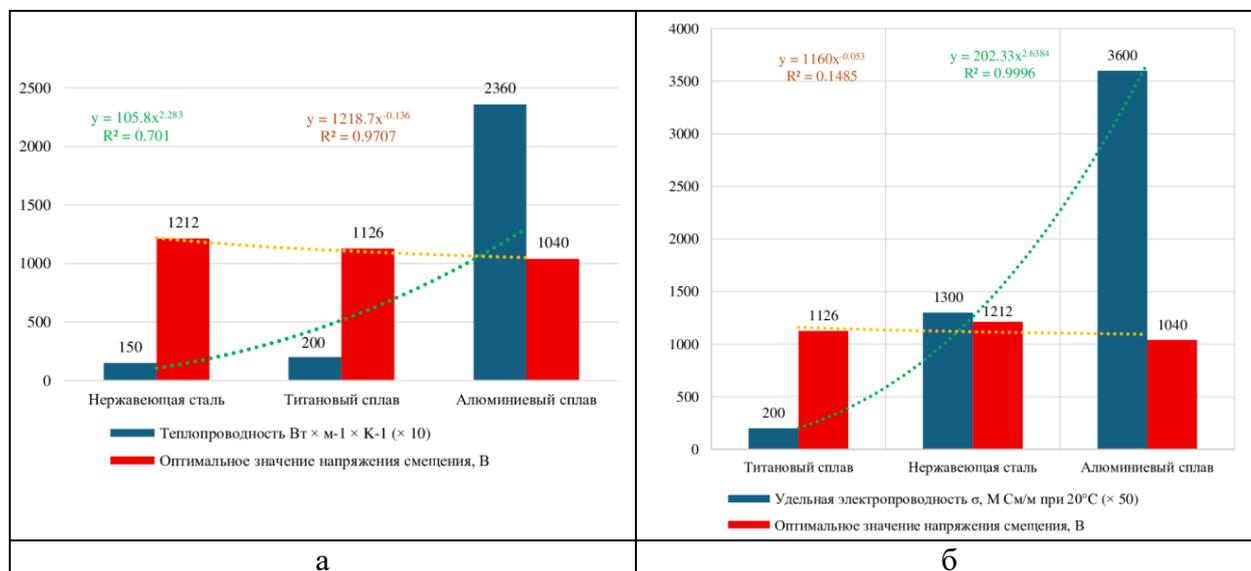


Рис. 11. Связь оптимальной величины напряжения смещения на субстрате и таких свойств материала субстрата, как теплопроводность (а) и электропроводность (б)

В четвертой главе представлены результаты исследования влияния параметров процесса подготовки поверхности на шероховатость образцов, а также коррозионную стойкость в соляном растворе (0,9 % NaCl).

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 (R_a 0,18; R_z 3,50 мкм) по сравнению с методом ИВ (рис. 12).

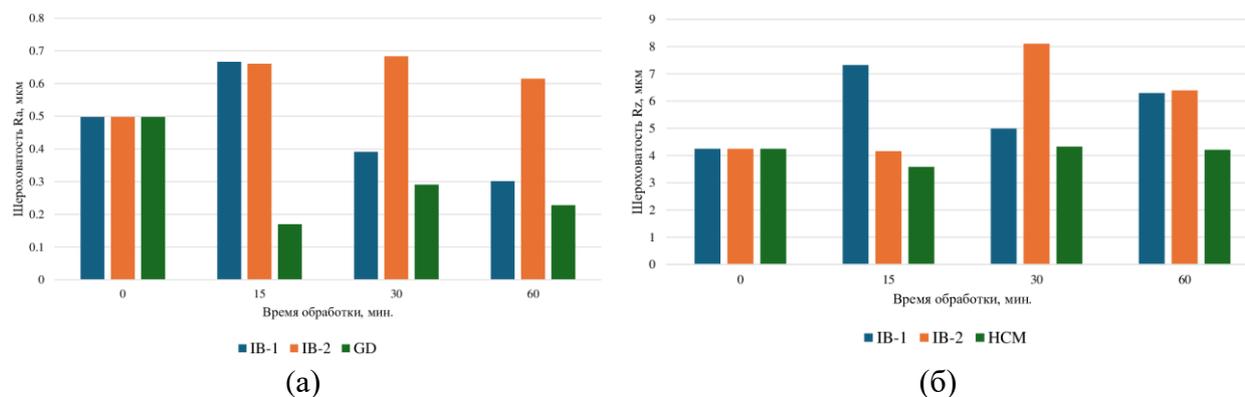


Рис. 12. Влияние времени и метода обработки поверхности на шероховатость R_a (а) и R_z (б)

Применение метода НСМ позволяет снизить оба показателя шероховатости, R_a и R_z , причем продолжительность обработки более 15 минут нецелесообразна,

так как ведет к некоторому повышению данных параметров. Применение метода IB ведет к заметному повышению показателей шероховатости. Применение предварительной обработки поверхности HCM-2 (напряжение смещения -1200 В) обеспечивает минимальные значения Rz и Ra после 5 минут обработки. Увеличение времени обработки не ведет к дальнейшему снижению шероховатости, соответственно не является целесообразной с точки зрения расхода времени и, в итоге, снижения эффективности процесса.

Осаждение на поверхности образцов из сплава ВТ6 покрытий ZrN HCM, ZrN IB и DLC позволяет затормозить коррозионное растворение основы на 30–40 % в сравнении с непокрытым образцом из титанового сплава ВТ6 (рис. 13). Для нитридных покрытий это явление обусловлено формированием нестехиометрического оксихлорида циркония, а для DLC покрытия – образованием слоя окисленного DLC при $+0,65$ В и последующим самопассивированием титановой основы. При этом покрытие ZrN HCM обладает лучшей стойкостью к коррозии за счет лучшей адгезии с субстратом, что препятствует проникновению раствора NaCl в области отслоения покрытия.

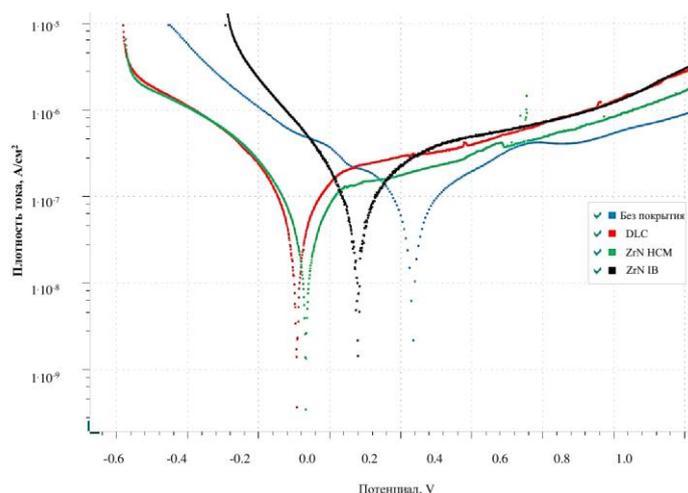


Рис. 13. Совмещение потенциодинамических кривых исследуемых покрытий ZrN IB, ZrN HCM и DLC на поверхности сплава ВТ6 в 0,9 % NaCl при 40 °С ($V_p = 10$ мВ/с) в сравнении с субстратом без покрытия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, имеющие существенное значение для развития машиностроительной отрасли и обеспечивающие повышение функциональных свойств изделий из различных материалов (твердого сплава, титанового и алюминиевого сплавов, нержавеющей стали) посредством применения усовершенствованной технологии подготовки (очистки и термоактивации) их поверхности в плазме тлеющего разряда с реализацией эффекта полого катода с последующим осаждением вакуумно-плазменных покрытий.

1. Выполненные аналитические и экспериментальные исследования различных процессов подготовки поверхности субстратов позволили выявить ряд эффектов,

наблюдающихся при обработке по усовершенствованной технологии с использованием плазмы тлеющего разряда с эффектом полого катода. В сравнении с традиционной обработкой в плазме вакуумно-дугового разряда установлены более высокая равномерность нагрева образцов по всему объему вакуумной камеры (амплитуды температур 125...140 °С и 50...60 °С соответственно), отсутствие растравливания поверхности субстратов, а также увеличение на 20...35 % прочности интерфейса (адгезионной прочности) между субстратом и осаждаемым в последующем вакуумно-плазменным покрытием.

2. На основе проведенного комплексного изучения состояния поверхностного слоя субстратов из твердого сплава установлено, что в процессе подготовки поверхности с использованием плазмы вакуумнодугового разряда наблюдается микровыкрашивание поверхностного слоя образцов и вытравливание кобальтовой связи с последующим формированием в структуре осажденного вакуумно-плазменного покрытия насыщенного кобальтом субслоя, снижающего функциональные свойства покрытия. При подготовке поверхности с использованием усовершенствованной технологии, микровыкрашиваний поверхностного слоя субстратов и вытравливание кобальта не наблюдается.

3. Установленные взаимосвязи между параметрами процесса очистки и термоактивации плазмой тлеющего разряда и свойствами вакуумноплазменных покрытий, осажденных на субстраты из различных материалов, позволили выявить ключевое влияние на адгезионную прочность и износостойкость покрытий теплопроводности субстрата, определяющей выбор рационального напряжения смещения в процессе обработки, которое для образцов из твердого сплава, титанового, алюминиевого сплавов и нержавеющей стали составило –1100 В, –1040 В, –1126 В и –1212 В соответственно.

4. Проведенный комплекс лабораторных стойкостных испытаний в МГТУ «СТАНКИН» и производственных испытаний на базе компании Jiangsu Tiangong Cemented Carbide Technology Co. Ltd. твердосплавных пластин с вакуумно-плазменными покрытиями (Zr,Hf,Al)N и (Ti,Al,Cr)N, осажденными в соответствии с усовершенствованной технологией подготовки поверхности в плазме тлеющего разряда, показал увеличение их износостойкости на 20–50 % при различных условиях механической обработки – точении конструкционной стали, фрезеровании титанового и жаропрочного никелевого сплава – по сравнению с твердосплавными пластинами, прошедшими традиционную обработку в плазме вакуумно-дугового разряда.

5. Выполненные в условиях трения скольжения сравнительные трибологические испытания образцов субстратов из различных материалов (титановый и алюминиевый сплавы, нержавеющая сталь) с вакуумноплазменными покрытиями Ti-TiN, осажденными в соответствии с усовершенствованной технологией подготовки поверхности в плазме тлеющего разряда, показали увеличение износостойкости на 30–50 % относительно образцов, прошедших традиционную обработку в плазме вакуумно-дугового разряда.

6. 6. Посредством проведенных испытаний на коррозионную стойкость образцов из титанового сплава с вакуумно-плазменными покрытиями ZrN, осажденными в соответствии с усовершенствованной технологией подготовки поверхности в плазме тлеющего разряда, установлено снижение скорости коррозии

на 30–40 % относительно образцов, прошедших традиционную обработку в плазме вакуумно-дугового разряда, что связано с меньшей шероховатостью поверхности и более высокой адгезионной прочностью сформированных покрытий, сдерживающих начало коррозионных процессов.

7. 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».

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в журналах, входящих в перечень ВАК

1. Верещака, А.А. Исследование структуры и фазового состава микрочастиц сферической формы, формирующихся в процессе осаждения PVD покрытий / А.А. Верещака, Н.С. Баранова, **И.М. Шмаков**, Е.С. Сотова // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2024. – № 2(69). – С. 40–52.

2. Верещака, А.А. Исследование структуры и фазового состава микрочастиц, формирующихся в процессе осаждения PVD покрытий, и их влияния на условия резания / А.А. Верещака, Н.С. Баранова, **И.М. Шмаков** // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2024. – № 3(70). – С. 8–14.

3. Верещака, А.А. Повышение износостойкости деталей из титановых сплавов путем осаждения на их рабочие поверхности покрытий DLC / А.А. Верещака, С.В. Федоров, Е.С. Сотова, К.М. Макаревич, **И.М. Шмаков**, П.Ю. Потапов // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2025. – № 2(73). – С. 36–47.

4. Верещака, А.А. Особенности ионной очистки и термоактивации поверхности твердосплавного субстрата перед осаждением износостойких покрытий / А.А. Верещака, Ю.И. Бубликов, **И.М. Шмаков**, Е.С. Сотова, П.Ю. Потапов // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2025. – № 3(74) – С. 41–55.

Публикации в журналах, цитируемых Scopus и Web of Science

5. Grigoriev, S. A Study of the Features of Coating Deposition on a Carbide Substrate Using Preliminary Etching with Glow-Discharge Plasma / Sergey Grigoriev, Marina Volosova, Yuri Bublikov, Catherine Sotova, Filipp Milovich, Anton Seleznev, **Илья Шмаков**, Alexey Vereschaka // Surfaces. – 2024. – V. 7. – P. 920–937.

6. Sotova, C. Features of the Influence of the Arrangement of Parts in the Chamber of Installation During Vacuum Arc Deposition on the Properties of Coatings / Catherine Sotova, Marina Volosova, Alexey Vereschaka, Yuri Bublikov, Filipp Milovich, Anton Seleznev, **Илья Шмаков**, Sergey Grigoriev // Applied Sciences. – 2024. – V. 14. – Art. No 10634.

7. Bublikov, Y. The influence of etching in a glow discharge plasma on the properties of wear-resistant coatings for metal-cutting tools / Yuri Bublikov, Alexey Vereschaka, Catherine Sotova, **Илья Шмаков** // High Temperature Material Processes. – 2025. – V. 29(1). – P. 43–52.

8. Vereschaka, A. The use of coatings with a nanolayer structure with constant and varying modulation periods to increase the wear resistance of cutting tools when turning a titanium alloy / Alexey Vereschaka, Natalia Baranova, Catherine Sotova, **Илья Shmakov** // High Temperature Material Processes. – 2025. – V. 29(4). – P. 35–46.

Другие публикации

9. Бибик, Н.В. Структура поверхностного слоя сплава АК12ММГН, подвергнутого высокоэнергетическому плазменному воздействию / Н.В. Бибик, Н.Н. Черенда, В.М. Асташинский, А.М. Кузьмицкий, С.Н. Григорьев, А.А. Верещака, К.М. Макаревич, **И.М. Шмаков** // Быстрозакаленные материалы и покрытия: материалы XXI-й Международной научно-технической конференции. 22-23 октября 2024 г. – Москва: МАИ, 2024. – С. 185–190.

10. Баранова, Н.С. Покрытия с нанослойной структурой и переменной величиной периода модуляции нанослоев, как путь дальнейшего повышения режущих свойств инструмента при точении заготовок из титанового сплава / Н.С. Баранова, А.А. Верещака, **И.М. Шмаков** // Адаптивные материалы и покрытия для высокотехнологичных отраслей промышленности: коллективная монография. – Москва: МГТУ «СТАНКИН», 2024. – С. 5–19.

Научное издание

Шмаков Илья Михайлович

**Повышение функциональных свойств изделий машиностроения
на основе применения усовершенствованной технологии
подготовки их поверхности с последующим осаждением
вакуумно-плазменных покрытий**

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук