

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПЛАЗМЕННЫЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ РАЗЯДА С ЗАМКНУТЫМ ДРЕЙФОМ ЭЛЕКТРОНОВ. РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ

Настоящая работа выполнена в Институте технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины. Цель работы – разработка технологии и технологических устройств для нанесения наноструктурированных покрытий, взамен используемых в промышленности в настоящее время. Проводились экспериментальные исследования, расчеты параметров рабочих процессов и конструкторская разработка плазменных технологических устройств. Использовались стандартные методики исследований и расчетов. Разработаны новые, запатентованные в Украине, плазменные технологические устройства различных типов для нанесения наноструктурированных покрытий на внутренние и наружные рабочие поверхности пар трения типа «цилиндр–поршень». Получены и испытаны образцы покрытий, плазменных технологических устройств и изделий с покрытиями. Подтверждена эффективность принятых технических решений. При использовании разработки в промышленности ожидается экологический и социальный эффект.

Дана робота виконана в Інституті технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України. Мета дослідження – розроблення технології і технологічних пристроїв для нанесення наноструктурованих покриттів замість технологій, що використовуються в промисловості на цей час. Проводились експериментальні дослідження, розрахунки параметрів робочих процесів і конструкторська розробка плазмових технологічних пристроїв. Використовувались стандартні методики досліджень і розрахунків. Розроблені нові, запатентовані в Україні, плазмові технологічні пристрої різноманітних типів для нанесення наноструктурованих покриттів на внутрішні і зовнішні робочі поверхні пар тертя типу «циліндр–поршень». Отримано і випробувано зразки покриттів, плазмових технологічних пристроїв і виробів з покриттями. Підтверджено ефективність прийнятих технічних рішень. При використанні розробки в промисловості очікується екологічний і соціальний ефект.

The present work was performed by the Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine. The work objective was to develop a technology and technological devices for applying nanostructured coatings instead of the existing ones. Experimental investigations, calculations of parameters of the working processes and engineering development of plasma technological devices were carried out. Standard techniques of studies and calculations were used. New plasma technological devices of various types, patented in Ukraine, for applying nanostructured coatings to the internal and external working surfaces of friction pairs of the cylinder–piston type are developed. Samples of coatings, plasma technological devices and coated products are obtained and tested. The efficiency of technical decisions taken is validated. Ecological and social effects of the development are intended to use in industry.

В современном машиностроительном производстве велика роль покрытий. Покрытия рабочих поверхностей элементов конструкции машин и механизмов позволяют существенно улучшить их функциональные и эксплуатационные характеристики без расширения потребления редких и дефицитных конструкционных материалов. Современные технологии нанесения покрытий базируются на достижениях нанотехнологии и постепенно вытесняют традиционные, зачастую малоэффективные и экологически неблагоприятные, технологии. Широкое использование современных технологий нанесения наноструктурированных покрытий в производственной практике сдерживается отсутствием специализированного технологического ионно-плазменного оборудования, адаптированного для обработки конкретных типов деталей.

**Цели и задачи работы.** Основными целями и задачами наших исследований за период с 2009 по 2013 год было удовлетворение потребностей авиакосмического машиностроения в разработках, базирующихся на современных достижениях нанотехнологии. Конкретизация направления исследований была связана с текущими потребностями государственных предприятий ГП Антонов и ГП ПО «Южмаш» в разработке технологии, плазменных тех-

нологических устройств и технологической оснастки для нанесения функциональных покрытий на внутренние рабочие поверхности титановых гидроцилиндров стоек шасси самолетов АН.

Стойки шасси в процессе эксплуатации испытывают значительные динамические нагрузки и абразивный износ. Давление гидрожидкости в полости гидроцилиндра стойки составляет 500 атм. При этом требуется обеспечить абсолютную герметичность полости высокого давления гидроцилиндра. Важнейшим показателем является усталостная долговечность деталей с покрытиями. Используемые в настоящее время промышленные технологии модификации свойств поверхности уже не удовлетворяют современным требованиям. Была поставлена задача разработать технологический комплекс, включающий технологию нанесения функционального покрытия на рабочие поверхности пар трения типа «цилиндр–поршень», технологические плазменные устройства и технологическую оснастку для нанесения покрытий в промышленных условиях. Разработанная технология должна заменить устаревшие технологии нанесения покрытий, в частности экологически неблагоприятную технологию гальванического хромирования. Покрытия должны удовлетворять современным требованиям улучшенной функциональности и эксплуатационной долговечности. Для использования разработки в производстве предусматривалась модернизация стандартной технологической ионно-плазменной установки «Булат 3».

**Методы исследований. Экспериментальные условия.** Исследования носили в основном экспериментальный характер. При теоретическом исследовании конфигурации полей в плазменных разрядных устройствах использовался метод конечных элементов, реализованный в компьютерной программе FEMM 4.2. При отработке технологии нанесения покрытий использовался минимальный набор методик, позволяющих судить о зависимости выходных характеристик покрытий от параметров технологического процесса. Определение параметров плазмы, физико-механических свойств и параметров микроструктуры покрытий выполнялось с использованием стандартных методик. При расчете параметров процессов распыления катода и конденсации покрытия использовались разработанные нами модельные представления [1], учитывающие специфику процессов в полузамкнутом внутреннем пространстве обрабатываемого изделия. Наноструктурированность покрытий устанавливалась по взаимосвязи между размером зерна и микротвердостью. Микротвердость покрытий измерялась микротвердомером ПМТ-3. Параметры микроструктуры покрытия и величины микронапряжений определялись с помощью рентгеновского дифрактометра с использованием стандартных методик.

Экспериментальные исследования проводились с использованием вакуумных установок с объемом вакуумных камер 1 м<sup>3</sup> и 0,25 м<sup>3</sup>. Камеры откачивались до давления  $5 \times 10^{-5}$  Торр. Каждая установка была оснащена системами снабжения рабочими газами, электро- и водоснабжения, системами измерения электрических параметров технологических устройств. Была разработана и изготовлена нестандартная система модулированного напуска технологических газов в рабочую зону. Использовались внутрикамерные координатные устройства для перемещения плазменных устройств, обрабатываемых деталей, экспериментальных образцов, электрических токоприемников и локальных зондов.

**Постановка задачи исследований.** Был выполнен аналитический обзор состояния исследований в области технологии нанесения наноструктурированных покрытий и определен мировой технической уровень разработок технологических устройств для их нанесения [2]. По данным обзора была подтверждена актуальность выбранного направления исследований. Методы создания наноструктурированных слоев изучены, отработаны и применяются на практике. Использование современных представлений о способах управления структурой материала и основ ионно-плазменных технологий позволяют формировать покрытия с уникальным сочетанием свойств, отличающихся от свойств массивных материалов.

В научно-технических и патентных источниках информации выявлено значительное число аналогов разрабатываемых плазменных устройств. Подавляющее большинство исследований и изобретений предназначено для использования в инструментальной промышленности. Прототипы плазменных устройств для нанесения наноструктурированных покрытий на внутренние поверхности малого диаметра выявлены не были.

Были определены базовые моменты теории и практики модификации свойств поверхности путем нанесения наноструктурированных покрытий. На этом основании был произведен выбор технологии и технологических устройств для нанесения функциональных наноструктурированных покрытий на внутренние рабочие поверхности титановых гидроцилиндров.

По результатам аналитического обзора были уточнены направления исследований. Сформулирована задача: изучить особенности функционирования плазменных устройств с замкнутым дрейфом электронов в специфических условиях обработки внутренних поверхностей. Результаты исследований использовались при разработке специализированных плазменных устройств для нанесения наноструктурированных функциональных покрытий на внутренние поверхности малого диаметра.

**Выбор покрытия.** Первым шагом решения прикладной задачи создания ионно-плазменной технологии взамен гальванического хромирования был выбор покрытия. Выбор гальванического твердого хрома как материала для защитного покрытия внутренних рабочих поверхностей гидроцилиндров, работающих в условиях интенсивного коррозионного и абразивного износа, являлся вполне обоснованным решением. Хром обеспечивает высокий уровень антикоррозионной защиты и обладает превосходными трибологическими характеристиками [3]. Основным недостатком гальванического твердого хрома является его микротрещиноватость, что не удовлетворяет требованиям абсолютной герметичности полости высокого давления силового гидроцилиндра. Кроме того, требование улучшения потребительских свойств изделий предполагает дальнейшее улучшение трибологических характеристик рабочих поверхностей пар трения (в частности микротвердости), а также повышение усталостной долговечности изделия с покрытием. Наноструктурированное ионно-плазменное хромовое покрытие должно обладать всеми достоинствами гальванического хрома, но при этом иметь беспористую структуру, повышенную твердость, низкий уровень внутренних напряжений и повышенную усталостную долговечность.

Для улучшения функциональных свойств рабочих поверхностей титановых гидроцилиндров перспективны также наноламинатные (слоистые) покрытия типа Cr-CrN. Перспективно покрытие из наноламината типа Ti-TiN.

**Выбор технологии осаждения покрытия.** Ионно-плазменные технологии реализуются в вакууме, что обеспечивает экологическую чистоту технологического процесса. Относительная сложность ионно-плазменных технологических плазменных устройств и технологической оснастки компенсируются высокой управляемостью и воспроизводимостью параметров технологического процесса и основных свойств покрытий.

При выборе технологии осаждения, альтернативной гальваническому хромированию, ключевым вопросом является создание технологических плазменных устройств, способных реализовать выбранную технологию нанесения покрытия при обработке внутренних поверхностей малого диаметра. При нанесении высококачественных хромовых покрытий в промышленности используется технология, основанная на электронно-лучевом испарении материала покрытия [4]. Однако конструктивная сложность и габаритность технологического оборудования делает невозможным применение этой технологии при обработке внутренних поверхностей малых диаметров.

Большое распространение получила ионно-плазменная технология нанесения покрытий, использующая испарители вакуумно-дугового типа [5]. Вакуумно-дуговая технология, в силу органически присущих ей особенностей, может иметь только ограниченную применимость для нанесения покрытий на внутренние поверхности гидроцилиндров. Вакуумно-дуговой разряд оказывает существенное термическое влияние на подложку и генерирует макрочастицы материала покрытия, что затрудняет получение совершенной наноструктуры покрытия. Наличие микрокапельной фазы в вакуумно-дуговых покрытиях требует финишной механической обработки. Установлено, что абразивная обработка неблагоприятно влияет на показатель усталостной долговечности изделий с покрытием. Нами была выбрана технология и технологические плазменные устройства на основе разряда с замкнутым дрейфом электронов. Типичными представителями устройств этого типа являются автономные источники энергетических газовых ионов (АИИ) [6] и магнетронные распылительные системы (МРС) [7, 8]. Магнетронная технология оказывает более низкое термическое влияние на подложку, что важно при обработке титановых сплавов. Магнетронные покрытия не ухудшают параметр шероховатости поверхности подложки.

На основании изучения литературной и патентной информации установлено, что действенным технологическим способом получения наноструктурированных покрытий является дополнительное энергетическое стимулирование процесса осаждения покрытия, так называемое плазменное или ионное ассистирование. Стимулирование осуществляется путем бомбардировки поверхности конденсации энергетичными частицами, извлекаемыми из плазмы. Для получения эффекта наноструктурирования достаточно, чтобы плотность тока энергетичных частиц на подложку была более  $1 \text{ мА/см}^2$  при средней энергии 30 – 100 эВ. Ионно-плазменная технология нанесения покрытий с ионным ассистированием может обеспечить получение требуемых свойств хромового покрытия.

#### **Разработка технологических плазменных устройств.**

*Разработка распыляющих плазменных устройств.* Принято выделять основные составляющие технологического процесса нанесения покрытия: предварительная ионная подготовка поверхности, формирование потока ма-

териала покрытия и, собственно, процесс формирования покрытия. При простейшей аппаратурной реализации технологического комплекса эти три задачи решаются различными техническими средствами. При совершенствовании технологического комплекса стремятся к интеграции ряда технологических функций в одном технологическом устройстве.

Для генерации потока частиц материала покрытия в ионно-плазменной технологии используются два типа плазменных устройств: вакуумно-дуговые испарители (ВДИ) цилиндрического и торцевого типа и магнетронные распылительные системы (МРС) цилиндрического и планарного типа.

Для нанесения покрытия на внутреннюю поверхность длинных трубчатых изделий проходного типа нами была принята конструкция цилиндрической магнетронной распылительной системы (ЦМРС) с продольным сканированием кольцевого разряда. Основной особенностью процесса ионно-плазменной обработки внутренней поверхности является ограниченность внутреннего объема полости обрабатываемого изделия. Во внутренней полости обрабатываемого изделия, на его оси, необходимо разместить плазменное устройство. В полости устройства должна размещаться магнитная система, создающая поле с индукцией не менее 40 мТл. Эти условия определяют минимальный диаметр катода, а значит и минимальный внутренний диаметр обрабатываемого изделия.

Другим ограничивающим фактором является возможность изготовления тонкостенного трубчатого катода, обладающего необходимым запасом распыляемого материала. Это условие легко выполнимо для катодов из пластичных материалов (алюминий, медь, титан). Из твердого и хрупкого хрома тонкостенный трубчатый катод изготовить практически невозможно. При изготовлении хромового катода ЦМРС нами было использовано гальваническое хромовое покрытие, которое наносилось на поверхность тонкостенной неферромагнитной трубки. Были испытаны и использовались трубчатые катоды из нержавеющей стали с наружным диаметром 12 мм с хромовым покрытием толщиной 0,1 мм.

Опытным путем было установлено, что характерный размер области, занятой магнетронным разрядом, примерно равен величине межполюсного зазора магнитной системы. При обработке внутренних поверхностей малого диаметра неизбежно использование обрабатываемого изделия в качестве анода. Было определено, что при уменьшении межэлектродного зазора до величины, равной половине межполюсного зазора, эффективность магнетронного разряда несколько падает, но его распылительная способность сохраняется. При величине межполюсного зазора 5 мм магнетронный разряд сохраняет распыляющие характеристики до величины межэлектродного промежутка около 3 мм. При выбранной конструкции ЦМРС минимальный диаметр обрабатываемой поверхности может равняться 13 – 15 мм.

Благодаря тому что при обработке поверхностей малого диаметра поверхность конденсации находится в непосредственном контакте с плазмой магнетронного разряда, при осаждении покрытия реализуется режим плазменного ассистирования. При увеличении внутреннего диаметра обрабатываемого изделия создаются условия при которых анодная граница магнетронного разряда отдалается от обрабатываемой поверхности. Это позволяет ввести в конструкцию ЦМРС дополнительный электрод (анод), что открывает

возможности использования режима осаждения покрытия с ионным ассистированием.

Нами были разработаны, испытаны и использовались цилиндрические магнетронные системы с наружной и внутренней распыляемой поверхностью, ЦМРС и ИнвЦМРС соответственно.

Для генерации потока частиц материала покрытия нами использовались также цилиндрические, торцевые и планарные генераторы магнетронного и вакуумно-дугового типа традиционной конструкции.

**Магнетронное распылительное устройство с коническим катодом.** Объектом нанесения покрытия на внутренние поверхности являются гидроцилиндры «проходного» и «непроходного» (с доньшком) типа. Необходимо было обеспечить возможность нанесения слоя покрытия на внутреннюю поверхность непроходного типа вплотную к замыкающему внутреннюю полость доньшку. Для решения этой задачи разработана магнетронная распыляющая система с коническим катодом – КМРС. Фото и конструктивная схема устройства представлены на рис. 1, где 1 – магнитные полюса, 2 – постоянный магнит, 3 – распыляемый катод, 4 – анод. Большее основание конического катода входило в обрабатываемую полость с зазором 4 мм.

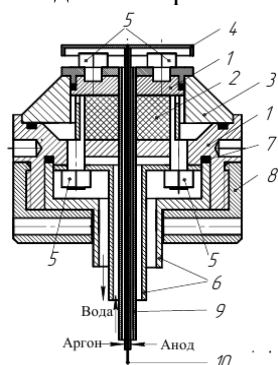


Рис. 1 [13]

На оси трубы подвода и отвода охлаждающей воды был выполнен канал, по которому был проложен токоподвод к дисковому аноду КМРС, смонтированному на малом торце плазменного устройства (на фото рис. 1 анод КМРС снят). Наличие независимого анода позволило использовать КМРС в режиме плазменного и ионного ассистирования. Коническая геометрия катода характеризовалась повышенным, по сравнению с планарной и цилиндрической конфигурацией, коэффициентом полезного использования распыляемого материала.

КМРС использовалась как в индивидуальном порядке, так и в составе интегрированных плазменных технологических устройств.

**Разработка плазменных устройств «гибридного» типа.** Для объединения в одной конструкции достоинств различных технологических устройств были разработаны плазменные устройства, включающие элементы, функционирующие на основе вакуумно-дугового разряда и разряда с замкнутым дрейфом электронов. Первым опытом создания подобной конструкции было плазменное устройство [9]. Конструкция устройства включала генератор частиц материала покрытия на основе двух расположенных встречно торцевых ВДИ и коаксиальную ускорительную ступень, работающую на основе разряда с замкнутым дрейфом электронов. Конструкция

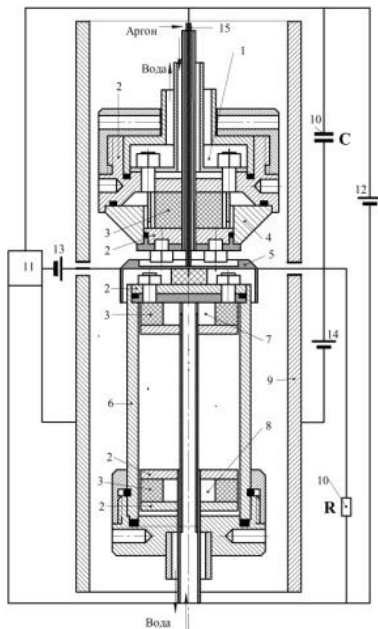


Рис. 2 [10]

устройства (см. рис. 2) оказалась достаточно сложной в изготовлении и эксплуатации и не получила дальнейшего развития.

Другой вариант плазменного устройства «гибридного» типа [10] включал два расположенных соосно цилиндрических плазменных устройства. Устройства работали поочередно. Одним из устройств являлось ВДИ, другим – МРС. Конструктивная схема устройства показана на рис. 2, где 1 – КМРС, 2 – ЦВДИ. Гибридное устройство включает: магнитные полюса – 2, постоянные магниты – 3, распыляемый катод КМРС – 4, общий анод – 5 и трубчатый катод ЦВДИ – 6. На фото рис. 5 показано это устройство для нанесения бронзового покрытия на внутреннюю поверхность стальной муфты. При работе устройства в режиме ВДИ производилась предварительная ионная подготовка обрабатываемой поверхности. Катоды ВДИ и

МРС были изготовлены из разных металлов для получения биметаллического покрытия. Совмещение в одной конструкции ВДИ и МРС позволило упростить процесс инициирования вакуумно-дугового разряда. С этой целью использовалась плазма, генерируемая МРС. Особенностью технологического плазменного устройства подобного типа является необходимость питания разрядов ВДИ и МРС отдельными источниками различных типов.

**Разработка плазменных устройств интегрированного типа.** Другим подходом к созданию технологических плазменных устройств было использование двух специализированных плазменных устройств, объединенных в один технологический комплекс, но работающих независимо. Такую схему мы называем плазменным технологическим устройством интегрированного типа. Были разработаны и испытаны различные конфигурации устройств такого типа, предназначенные для обработки трубчатых изделий проходного типа.

1. В разряде с замкнутым дрейфом электронов плазма сосредоточена в области, где существует магнитное поле, т. е. у катода магнетрона. Это является и достоинством, и недостатком МРС. Для осаждения покрытия с дополнительным энергетическим воздействием (плазменное, ионное ассистирование) у обрабатываемой поверхности подложки должна существовать плазма. Это обеспечивается различными способами, суть которых сводится к использованию дополнительных источников электронов.

Нами разработана и испытана [11] схема магнетронного устройства с точечным источником электронов на основе полого катода. Дополнительный источник электронов позволил понизить рабочее давление магнетрона, что позволило увеличить дистанцию нанесения покрытия и сделало возможным обработку изделий объемной конфигурации. При этом облегчались условия создания плазмы у поверхности конденсации. Появилась возможность эффективной предварительной ионной обработки поверхности конденсации и ионного ассистирования процесса осаждения.

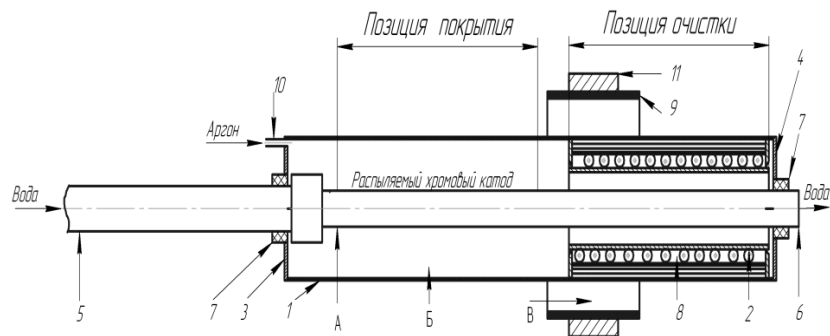


Рис. 3 [12]

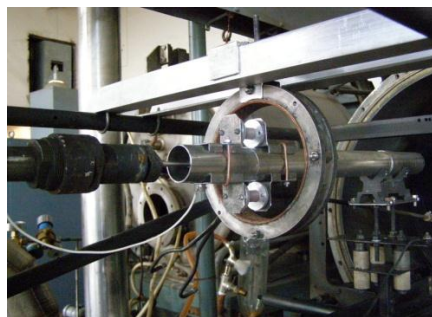


Рис. 4



Рис. 5

2. Для обработки внутренней поверхности трубчатых изделий проходного типа малого диаметра и большой длины было разработано устройство [12, 13], включающее цилиндрические магнетроны прямого и инверсного типа. Устройство использовалось для решения прикладной задачи нанесения хромового покрытия на внутреннюю рабочую поверхность гильзы титанового гидроцилиндра диаметром 30 мм. Конструктивная схема устройства показана на рис. 3, где 1 – газовый «скафандр». «Скафандр» смонтирован на оси инверсного магнетрона – 11 и может совершать возвратно-поступательное перемещение вдоль оси распыляемого катода ЦМРС. От катода ЦМРС «скафандр» и смонтированное в его полости распыляемое изделие – 2 изолирован диэлектрическими втулками – 7. Общий вид технологического устройства в вакуумной камере показан на рис. 5. При относительном перемещении ИнвМРС и обрабатываемой поверхности осуществлялась ее предварительная ионная подготовка. Нанесение покрытия на внутреннюю поверхность детали осуществлялось путем продольного сканирования магнитной системы в полости трубчатого водоохлаждаемого катода ЦМРС. Элемент магнитной системы ограничивал замкнутую область магнетронного разряда в поперечном сечении трубчатого катода. В полости распыляемого катода могли последовательно располагаться несколько элементов магнитной системы. Таким путем увеличивался суммарный ток магнетронного разряда и повышалась производительность нанесения покрытия. Ограничением производительности устройства является возможность обеспечения протока охлаждающей воды через катод. Нормой протока воды принимался расход 1 л/мин на 1 кВт мощности разряда.

3. С использованием КМРС было разработано интегрированное плазменное устройство дуального типа. Устройство включает две расположенных



оппозитно КМРС [14] и предназначено для нанесения биметаллических покрытий на внутреннюю поверхность изделия проходного типа с плазменным ассистированием. В устройствах дуального типа между индивидуальными плазменными устройствами создается расширенная область замкнутого (обобщенного) магнитного поля, что облегчает организацию предварительной ионной обработки изделия и ионного ассистирования. Конструкция устройства показана на рис. 6.

4. Другое интегрированное устройство дуального типа включало два магнетронных распылителя планарного типа с объединенным магнитным полем [15]. Как показано на рис. 7, обрабатываемое изделие располагалось между плазменными устройствами в области существования разреженной плазмы, что использовалось для предварительной ионной обработки и ионного ассистирования.

5. КМРС была использована в интегральном устройстве, включающем соосно расположенные в полости трубчатого изделия КМРС и автономный источник газовых ионов на основе ускорителя ионов с анодным слоем (УАС) [16]. Магнитные системы устройств создавали обобщенное магнитное поле,

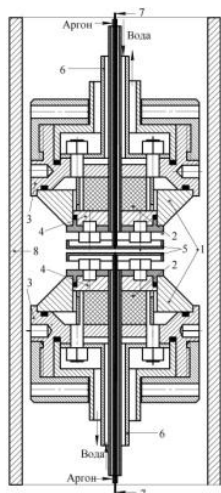


Рис. 6 [14]

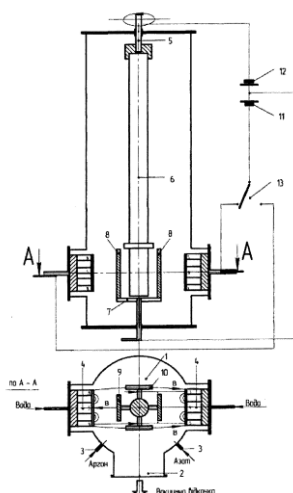


Рис. 7 [15]

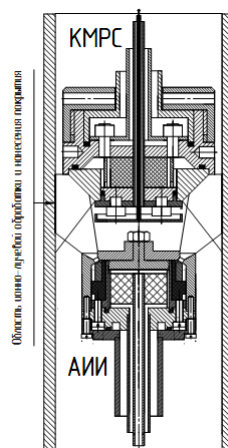


Рис. 8

как в дуальной схеме конических магнетронов. Автономный ионный источник с замкнутым дрейфом электронов и узкой областью ускорения (ускоритель с анодным слоем – УАС) мог работать в режиме генерации плазмы и в режиме генерации ускоренных газовых ионов. Поток ускоренных ионов служил для предварительной ионной подготовки поверхности, а из плазмы на подложку экстрагировались низкоэнергетичные газовые ионы ассистирования. Конструкция устройства показана на рис. 8.

6. Была разработана и использовалась для решения прикладной задачи интегрированная схема плазменных устройств для нанесения покрытий на внутреннюю и наружную рабочие поверхности штока силового двухступенчатого гидроцилиндра. Для обработки внутренней поверхности использовался магнетрон с коническим катодом. Магнитное поле конического магнетрона, выходящее на наружную поверхность штока, использовалось для поддержания магнетронного разряда, служившего для ионной подготовки поверхности. Обработка наружной поверхности обеспечивалась двумя оппозитно расположенными планарными магнетронами несбалансированного ти-

па. Конструктивная схема интегрированного устройства аналогична схеме устройства, показанного на рис. 7.

7. Интегрированное устройство, изображенное на рис. 9, предназначалось для нанесения молибденового покрытия толщиной 50 мкм на наружную поверхность цапфы диаметром 30 мм. На рисунке показаны: 1 – катод ВДИ; 2 – катод ИнвЦМРС; 4 – обрабатываемое изделие. Производственная технология, основанная на использовании торцевого вакуумно-дугового испарителя, характеризовалась чрезвычайно низким (порядка 10 %) использованием материала катода и соответственно низкой производительностью нанесения покрытия. Была разработана схема интегрированного плазменного устройства с инверсным цилиндрическим магнетронным распыляющим устройством. Использование материала катода в ИнвЦМРС достигает 90 %. Для предварительной подготовки поверхности цапфы использовался торцевой ВДИ с молибденовым катодом.

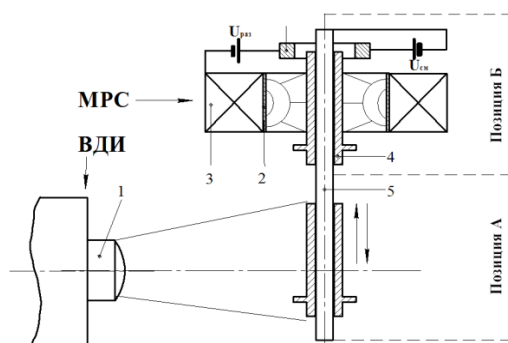


Рис. 9 [15]

**Исследование несбалансированности магнитной системы МРС.** Так как наиболее действенным способом наноструктурирования покрытия является бомбардировка растущего конденсата низкоэнергетичными ионами (ионное ассистирование), подробно исследовались конструкции МРС, обеспечивающие возможность извлечения газовых ионов из разряда МРС [17, 18]. Были выполнены теоретические и экспериментальные исследования параметрических способов управления разрядными характеристиками МРС путем создания несбалансированности магнитного поля в магнетронах планарного и цилиндрического типов.

**Разработка несбалансированной цилиндрической распыляющей системы (НбЦМРС).** В результате исследований характеристик несбалансированности магнитного поля в магнетронах различных типов была создана оригинальная, не имеющая аналогов в мировой практике, конструкция магнетронного устройства, позволяющая выполнять все технологические функции нанесения наноструктурированного покрытия на внутреннюю поверхность [19]. По сравнению с планарным прототипом несбалансированного магнетрона цилиндрическая несбалансированная магнетронная распыляющая система имеет отличительный признак, позволяющий сканировать поверхность конденсации покрытия потоком ионов ассистирования. Это достигается управлением конфигурацией магнитного поля НбЦМРС электромагнитными катушками. Конструктивная схема показана на рис. 10, где: 2 – обрабатываемая поверхность; 3, 4 – источники питания; 5 – распыляемый катод; 6 – маг-

нитные полюса; 7 – постоянные магниты; 8 – электромагнитные катушки. На рис. 11 показана картина магнитного поля в НБЦМРС в положении с отклоненным потоком ионов ассистирования. Разработанный тип плазменного устройства позволяет реализовать концепцию ионно-плазменной установки коаксиального типа (с осевым расположением распыляющего устройства) для нанесения наноструктурированных покрытий по групповой технологии.

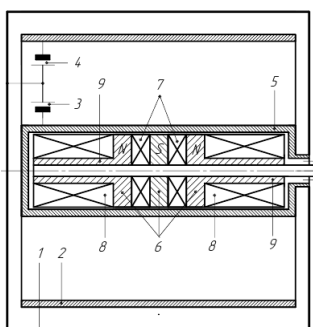


Рис. 10

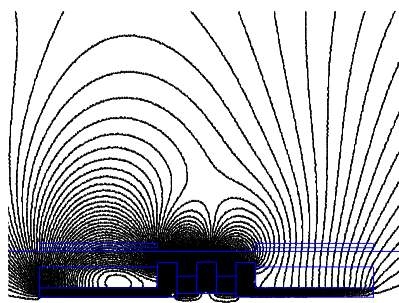


Рис. 11

**Исследование рабочих режимов плазменных устройств.** Исследование рабочих режимов производилось с целью определения пределов технологического применения разработанных плазменных технологических устройств и с целью разработки технологических процессов обработки конкретных изделий.

Исследовалось влияние геометрических параметров устройства и обрабатываемого изделия на характеристики магнетронного разряда. С помощью экспериментального устройства с подвижными анодами было определено положение анодной границы магнетронного разряда и его зависимость от конструктивных и разрядных параметров магнетрона. Исследовалась прямая и инверсная конструкция магнетрона. Особенности поведения анодной границы обсуждались выше. Экспериментально обнаружено существование катодной границы разряда. Оказалось, что катодная граница ограничивает область разряда, объем которой существенно превышает объем области темного катодного пространства тлеющего разряда. Подробное изучение причин обнаруженной аномалии не производилось.

Изучалась связь профиля ионной эрозии катода с распределением плотности разрядного тока поперек зоны магнетронного разряда и с конфигурацией магнитного поля в магнетронном разряде. Установлено, что известные из литературных источников [20] представления о соответствии профиля эрозии катода профилю плотности тока и распределению величины магнитной индукции в том же сечении справедливы только для плоской поверхности катода. При выработке катода профиль эрозии оказывается существенно уже поперечного распределения магнитной индукции. Подробное изучение этих зависимостей не производилось, так как в разработанных нами устройствах при сканировании поверхности катода магнетронным разрядом наблюдается равномерная эрозия катода.

При работе с минимальными межэлектродными расстояниями эффекты обратной диффузии и рассеивания распыленного материала катода становятся несущественными. Это позволяет работать при повышенных давлениях рабочего газа, что создает возможность ограничения области плазменной об-

работки «скафандром», давление в котором может поддерживаться выше давления в вакуумной камере. Такая мера позволяет изолировать область обработки от среды, в которой имеются загрязняющие углеводородные компоненты (пары вакуумного масла) и повысить чистоту покрытия. Конструкция устройства со «скафандром» была реализована в интегрированном плазменном устройстве [13].

В разработанных плазменных устройствах предварительная ионная подготовка обрабатываемой поверхности обеспечивалась газовыми или металлическими энергетическими ионами, генерируемыми интегрированными устройствами, или газовыми ионами ассистирования при высоковольтном смещении на подложке. Для предварительной ионной подготовки замечательными свойствами обладает разряд инверсного магнетрона. Легко регулируемая величина плотности тока и энергии ионов магнетронного разряда позволяет рассматривать его как эффективное средство для нагрева и ионного травления обрабатываемой поверхности (см. рис. 3). К сожалению этот способ предварительной подготовки не универсален и применим только для изделий из неферромагнитных металлов.

При обработке сравнительно массивных (4 – 5 кг и более) изделий обнаружилось, что за время, необходимое для нагрева изделия до технологической температуры (более 300 – 350°C) происходит ионное растравливание прецизионной обрабатываемой поверхности. Для предотвращения этого нежелательного эффекта в качестве плазмообразующего газа был использован гелий. При равной мощности магнетронного разряда при работе на гелии скорость нагрева практически не изменилась, а скорость ионного травления была снижена почти на порядок. Такое техническое решение эквивалентно использованию электронного нагрева, но не требует использования дополнительного оборудования.

В наших экспериментах был отработан оригинальный режим предварительной подготовки поверхности при работе несбалансированного магнетрона. В режиме предварительной подготовки на обрабатываемое изделие подавался катодный потенциал магнетронного разряда. При этом реализовался режим работы плазменного устройства, аналогичный режиму работы разрядной ячейки Пеннинга. Подобный режим удобно использовать для нанесения покрытий на малогабаритные изделия и опытные образцы. При обработке массивных изделий этот режим неприменим, так как первые слои покрытия конденсируются на недостаточно подготовленную (холодную) поверхность подложки. Это может быть причиной неудовлетворительной адгезии покрытия. При использовании режима Пеннинга для ионной подготовки массивных изделий нами использовался гелий, что существенно ослабляло влияние нежелательного эффекта нанесения первого слоя покрытия на неподготовленную поверхность.

Режимы работы наших магнетронных устройств по основным характеристикам мало отличались от общепринятых. С целью повышения производительности генерации частиц покрытия нами использовались магнетронные устройства с высоким значением магнитной индукции. При мощности разряда 2,5 кВт величина плотности разрядного тока магнетрона достигала 200 мА/см<sup>2</sup> и более. При нанесении хромового покрытия в режиме работы НБПМРС с диаметром катода 70 мм, при  $U_p = 500$  В и  $I_p = 5$  А, величина удельной эрозии катода изменяется от  $8,3 \times 10^{-4}$  мг/Дж (при неэродированном,

новом катоде), до  $9,2 \times 10^{-4}$  мг/Дж (на катоде с предельной эрозионной выработкой).

**Характеристики покрытий и технологий их нанесения.** На внутреннюю рабочую поверхность гильзы штатного титанового гидроцилиндра диаметром 30 мм наносилось наноструктурированное хромовое покрытие. Микротвердость покрытия превышала микротвердость твердого гальванического хрома и достигала значения  $1500 \text{ кгс/см}^2$ . Стендовые ресурсные испытания гидроцилиндра показали сохранение герметичности на всем протяжении расчетного срока эксплуатации изделия. Была продемонстрирована работоспособность изделия с покрытием в течение периода, превышающего расчетное значение ресурса.

Для нанесения на внутреннюю поверхность слоистых (ламинатных) покрытий Me–MeN была разработана система синхронной модуляции расхода азота. Подача азота в реакционную зону синхронизировалась с периодом сканирования внутренней поверхности магнетронным разрядом. Выбором параметров сканирования и модуляции расхода азота можно было создавать равно- или разнотолщинные ламинатные покрытия с различными свойствами. Получены образцы ламинатных покрытий (см. рис. 12). Твердость покрытия превышала твердость наноструктурированного хрома, полученного в режиме с ионным ассистированием, и достигала  $2000 \text{ кгс/см}^2$ .

Подтверждено, что ионное ассистирование поверхности конденсации ионами аргона с энергией до 100 эВ и плотностью тока  $1 - 10 \text{ мА/см}^2$  приводит к измельчению структуры покрытия. Выводы сделаны на основании регистрации уширения линии хрома, полученной на рентгеновском дифрактометре. Величина уширения определялась относительно уширения линии хрома, полученной на образце хрома из распыляемого катода. Выявлено, что микротвердость хромового покрытия, полученного в прерывистом режиме, имитирующем режим нанесения покрытия с вращением и продольным сканированием, выше микротвердости, полученной при непрерывном режиме

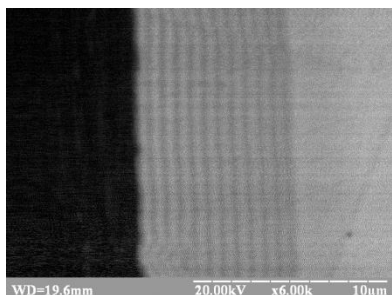


Рис. 12

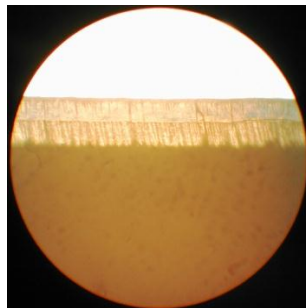


Рис. 13

нанесения покрытия, и соответствует микротвердости ламината. На рис. 13 показан шлиф покрытия, полученного с остановкой процесса нанесения. Видна граница, которая, по-видимому, формируется из-за наличия паров вакуумного масла в вакуумной камере.

Покрытия наносились как на экспериментальные образцы, так и на натурные изделия. Нанесение покрытий на образцы натуральных изделий использовались как для отработки параметров технологии обработки, так и для исследования характеристик покрытий, работающих в составе изделия в натуральных условиях.

**Практическое использование результатов исследований и разработок.** Экспериментальные работы производились на экспериментальном вакуумно-плазменном стенде. Отработаны технические решения плазменных устройств и технологической оснастки. Разработан проект модернизации ионно-плазменной установки Булат 3 с использованием разработанных плазменных устройств и оснастки. Разработан концептуальный проект специализированной установки для ионно-плазменной обработки рабочих (внутренних и наружных) поверхностей широкой номенклатуры деталей пар трения типа «цилиндр – поршень».

Разработанные плазменные устройства и технологическая оснастка использовались для нанесения различных покрытий на другие, предлагаемые нашими традиционными заказчиками детали. Отрабатывалась технология нанесения ферромагнитного никелевого покрытия. На цапфы наносилось молибденовое покрытие. На кольца торцевого уплотнения наносилось многослойное покрытие медь – нержавеющая сталь – медь. На внутреннюю поверхность муфты наносилось антифрикционное бронзовое покрытие. Имели место и другие подобные разовые применения.

Разработка ориентирована на использование в производстве титановых гидроцилиндров специального назначения (для стоек шасси самолетов АН), однако не исключается ее использование в массовом производстве гидроцилиндров разнообразного назначения, включая гидроцилиндры горных машин и проходческих комплексов, а также гильз кристаллизаторов машин непрерывного литья трубной заготовки.

1. Кучугурный Ю. П. Особенности пространственной структуры потока распыленных атомов в магнетронных устройствах цилиндрического типа / Ю. П. Кучугурный, С. И. Гринюк, А. Д. Гришкевич // Проблемы высокотемпературной техники. – 2011. – С. 64 – 70.
2. Гришкевич А. Д. Наноструктурированные покрытия как альтернатива гальваническому хромированию внутренних поверхностей / А. Д. Гришкевич // Техническая механика. – 2013. – № 3. – С. 117 – 127.
3. Ройх И. Л. Нанесение защитных покрытий в вакууме / И. Л. Ройх, Л. Н. Колтунова, С. Н. Федосов. – М.: Машиностроение, 1976. – 368 с.
4. Мовчан Б. Л. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме / Б. Л. Мовчан, И. С. Малашенко. – Киев: Наукова думка, 1983. – 272 с.
5. Вакуумная дуга / И. И. Аксенов, А. А. Андреев, В. Л. Белоус, В. Е. Стрельницкий, В. М. Хороших. – Киев: Наукова думка, 2012. – 727 с.
6. Гришин С. Д. Плазменные ускорители / С. Д. Гришин, Л. В. Лесков, Н. П. Козлов. – М.: Машиностроение, 1983. – 226 с.
7. Данилин Б. С. Магнетронные распыленные системы / Б. С. Данилин, В. К. Сырчин. – М.: Радио и связь, 1982. – 287 с.
8. Кузьмичев А. И. Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления / А. И. Кузьмичев. – Киев: Аверс, 2008. – 244 с.
9. Декларационный патент на винахід №63164А, Україна, МПК С23С 14/00. Плазмовий пристрій / Гришкевич О. Д., Масляний М. В.; заявник і патентоволодар Інститут технічної механіки НАНУ і НКАУ. – 2003021162; заяв. 10.02.2003; опубл. 15.01.2004. Бюл. №1. – 4с.
10. Патент на винахід №93833U, Україна, МПК С23С 14/00. Іонно-плазмовий пристрій «гібридного» типу / Гришкевич О. Д.; заявник і патентоволодар Інститут технічної механіки НАНУ і НКАУ. – а201005613; заяв. 11.05.2010; опубл. 10.03.2011. Бюл. №5. – 4с.
11. Гришкевич А. Д. Использование плазменного источника электронов в магнетронной системе ионного распыления // А. Д. Гришкевич, А. В. Хитько / Проблемы высокотемпературной техники. – 2011. – С. 42 – 45.
12. Гришкевич А. Д. Нанесение функционального покрытия на внутреннюю стенку осесимметричного изделия малого диаметра / А. Д. Гришкевич / Проблемы высокотемпературной техники. – 2011. – С. 37 – 41.
13. Патент на винахід №38845U, Україна, МПК С23С 14/00. Плазмовий пристрій / Гришкевич О. Д.; заявник і патентоволодар Інститут технічної механіки НАНУ і НКАУ. – u200808700; заяв. 01.07.2008; опубл. 26.01.2009. Бюл. №2. – 4с.
14. Патент на винахід №93471, Україна, МПК С23С 14/35, 14/56. Іонно-плазмова установка / Гришкевич О. Д., Гринюк С. І.; заявник і патентоволодар Інститут технічної механіки НАНУ і НКАУ. – а201005669; заяв. 11.05.2010; опубл. 10.02.2010. Бюл. №23.

15. Патент на винахід №38846, Україна, МПК С23С 14/35, 14/56. Установа для нанесення нанометричних покриттів с періодичною структурою / *Гришкевич О. Д., Кучугурный Ю. П.*; заявник и патентоволодар Інститут технічної механіки НАНУ и НКАУ. – а200808701; заявл. 01.07.2008; опуб. 26.01.2009. Бюл. № 2.
16. *Гришкевич А. Д.* Ионно-плазменная технология и технологические плазменные устройства для нанесения защитных покрытий на внутренние рабочие поверхности / *А. Д. Гришкевич* // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика: Часть 2. Материалы 15-ой международной научно-практической конференции. – СПб: Изд-во Политех. ун-та, 2013. – С. 133 – 138.
17. *Гришкевич А. Д.* Исследование характеристик несбалансированности магнетронной распылительной системы. / *А. Д. Гришкевич, С. И. Гринюк* // Проблемы высокотемпературной техники. – 2012. – С. 42 – 49.
18. *Гришкевич А. Д.* Исследование топологии электрического и магнитного полей в магнетронных распылительных системах / *А. Д. Гришкевич* // Информационные технологии в управлении сложными системами – 2013 [Электронный ресурс] научная конференция (19 – 20 июня 2013 г.): сборник докладов / Под редакцией академика НАН Украины В. В. Пилипенко. – Днепропетровск: Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, 2013. – Режим доступа к сборнику <http://www.itm.dp.ua/>
19. *Гришкевич А. Д.* Цилиндрическая магнетронная распылительная система с ионным ассистированием / *А. Д. Гришкевич* // Техническая механика. – 2013. – № 2. – С. 3 – 13.
20. *Бурмакинский И. Ю.* Расчет профиля выработки катода для магнетронных систем ионного распыления / *И. Ю. Бурмакинский* // ЖТФ. – 2003. – Т. 73, В. 9. – С. 46 – 50.

Институт технической механики  
НАН Украины и ГКА Украины,  
Днепропетровск

Получено 04.10.13,  
в окончательном варианте 25.10.13