УДК 621.002.56 https://doi.org/10.15407/itm2019.03.098

А. Д. ГРИШКЕВИЧ, С. И. ГРИНЮК

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНЕТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЕННО-ИММЕРСИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: Gryshkevych.O.D@nas.gov.ua

Метою роботи є дослідження можливості застосування плазмово-імерсійної технології для локальної зміцнюючої обробки зовнішніх поверхонь тертя габаритних трубчастих деталей і групової зміцнюючої обробки об'ємних деталей з розвиненою геометрією зовнішньої поверхні. Розглядається комплексна технологія, що включає високоінтенсивну низькоенергетичну імплантацію азоту і нанесення функціонального наноструктурного покриття.

Досліджено особливості застосування джерела прискорених газових іонів для проведення комплексної технології поверхневої обробки робочої поверхні пари тертя. Комплексна технологія включає іонне полірування для видалення наслідків абразивної обробки. Виявлені особливості попередньої підготовки поверхні перед покриттям в умовах «масляної» відкачки при обробці деталей із титанових сплавів. Для забезпечення імерсійного характеру обробки застосовано оригінальний спосіб підключення джерела живлення розряду прискорювача іонів.

Експериментально доведено, що планарний магнетронний пристрій незбалансованого типу може створювати потік пучкової плазми для проведення попередніх операцій нагріву, очищення та активації поверхні оброблюваного об'єкта. З його допомогою забезпечується нанесення функціонального покриття, а також створюється робоче плазмове середовище для проведення локальної та групової імерсійної технології високоінтенсивної низькоенергетичної імплантації азоту.

Обгрунтовано застосування плазмових пристроїв магнетронного типу, які повинні забезпечувати проведення плазмово-імерсійної обробки в розрідженій плазмі несамостійного тліючого розряду. Розроблено і випробувано магнетронний пристрій для нанесення покриття при зниженому робочому тиску $(7 – 8) \times 10^{-4}$ Торр. Завдяки сильній незбалансованості магнітної системи магнетрона формується потік пучкової плазми. Пучкова плазма використовується для локальної плазмово-імерсійної обробки і в газорозрядному джерелі електронів для ініціювання несамостійного тліючого розряду. Розроблено інтегрований плазмовий пристрій, що включає планарний незбалансований магнетрон і електродну систему плазмового широкоапертурного джерела електронів.

Отримано експериментальні зразки плазмово-імерсійної обробки. Отримано результати, що не суперечать очікуваним.

Ключові слова*: плазмово-імерсійна технологія, іонно-плазмова технологія, іонно-променева технологія, високоінтенсивна низькоенергетична іонна імплантація, несамостійний тліючий розряд, планарна незбалансована магнетронна розпилювальна система, іонне джерело з замкнутим дрейфом електронів, широкоапертурне джерело електронів, порожнистий катод.*

Целью работы является исследование возможности применения плазменно-иммерсионной технологии для обработки внешних поверхностей трения габаритных трубчатых деталей и групповой упрочняющей обработки объемных деталей с развитой геометрией наружной поверхности. Рассматривается комплексная технология, включающая высокоинтенсивную низкоэнергетичную имплантацию азота и нанесение наноструктурного функционального покрытия.

Исследованы особенности использования источника ускоренных газовых ионов для проведения комплексной технологии поверхностной обработки рабочей поверхности пары трения. Комплексная технология включает ионную полировку для устранения последствий абразивной обработки. Выявлены особенности предварительной обработки поверхности перед покрытием в условиях «масляной» откачки при обработке деталей из титановых сплавов. Для обеспечения иммерсионного характера обработки использован оригинальный способ подключения источника питания разряда ускорителя ионов.

Экспериментально доказано, что планарное магнетронное устройство несбалансированного типа может создавать поток пучковой плазмы для проведения предварительных операций нагрева, очищения и активации поверхности обрабатываемого объекта. С его помощью обеспечивается нанесение функционального покрытия, а также создается рабочая плазменная среда для проведения локальной и групповой иммерсионной технологии высокоинтенсивной низкоэнергетической имплантации азота.

Обосновано применение плазменных устройств магнетронного типа для обеспечения плазменно-иммерсионной обработки в разреженной плазме несамостоятельного тлеющего разряда. Разработано и испытано магнетронное устройство для нанесения покрытия при пониженном рабочем давлении $(7 – 8) \times 10^{-4}$ Торр. Благодаря сильной несбалансированности магнитной системы магнетрона формируется поток пучковой плазмы. Пучковая плазма используется для локальной плазменно-иммерсионной обработки и в газоразрядном источнике электронов для инициирования несамостоятельного тлеющего разряда. Разработано интегрированное плазменное устройство, включающее планарный несбалансированный

магнетрон и электродную систему плазменного широкоапертурного источника электронов.

Получены экспериментальные образцы плазменно-иммерсионной обработки. Полученные результаты не противоречат ожидаемым.

Ключевые слова: *плазменно-иммерсионная технология, ионно-плазменная технология, ионно-лучевая технология, высокоинтенсивная низкоэнергетичная ионная имплантация, несамостоятельный тлеющий разряд, планарная несбалансированная магнетронная распылительная система, ионный источник з замкнутым дрейфом электронов, широкоапертурный источник электронов, полый катод.*

The aim of this work is to study the possibility of using a plasma immersion technology in the local strengthening treatment of the outer friction surfaces of properly sized tubular parts and the group strengthening treatment of sculpture parts whose outer surface has a developed geometry. Consideration is given to a package technology that includes a high-intensity low-energy nitrogen implantation and the deposition of a nanostructure functional coating.

The features of using an accelerated gas ion source in the package technology of friction pair working surface treatment were studied. The package technology includes ion polishing, which eliminates the consequences of abrasive treatment. For titanium alloy parts, the features of surface pretreatment prior to coating deposition in the case of “oil” pumping were revealed. For the treatment to be of an immersion character, a novel method was used for the connection of a power source for the ion accelerator discharge.

It was shown by experiment that an unbalanced planar magnetron device can generate a plasma beam for the preparation operations of heating, cleaning, and activation of the surface of the part under treatment. With its help, a functional coating is deposited, and a working plasma environment is produced for the local and group immersion technology of high-intensity nitrogen implantation.

The use of magnetron-type plasma devices, which allow plasma immersion treatment in a rarefied non-self-maintained glow discharge plasma, was substantiated. A magnetron device for coating deposition at a reduced pressure of 7×10^{-4} to 8×10^{-4} Torr was developed and tested. Due to the magnetic system of the magnetron being highly unbalanced, a plasma beam is formed, which is used in local plasma immersion treatment and in a gas-discharge electron source for initializing a non-self-maintained glow discharge. An integrated plasma device, which includes an unbalanced planar magnetron and an electrode system for a wide-aperture plasma electron source, was developed.

Prototype samples treated by the plasma immersion technology were prepared. The results obtained are in agreement with the expected ones.

Keywords: *plasma immersion technology, ion plasma technology, ion beam technology, high-intensity low-energy ion implantation, non-self-maintained glow discharge, unbalanced planar magnetron sputtering system, ion source with closed electron drift, wide-aperture electron source, hollow cathode.*

Состояние вопроса. Технологии обработки поверхности являются важнейшим компонентом комплекса основных промышленных технологий в машиностроении. Благодаря развитию высокотехнологичных отраслей производства в машиностроении получили распространение вакуумные электронно-лучевые, ионно-плазменные и ионно-лучевые технологии. В настоящее время наряду с традиционными технологиям поверхностной обработки, которые базируются на силовом воздействии на поверхность, успешно применяются технологии поверхностной обработки, основанные на физическом воздействии концентрированных потоков энергии на поверхность.

Развитие вакуумно-плазменных технологий стало возможным благодаря разработке разнообразных плазменных технологических устройств. Технологические плазменные устройства обеспечивают создание плазменной технологической среды, которая характеризуется различной плотностью плазмы, элементным и зарядовым составом ее активных компонентов, различным пространственным распределением её локальных энергетических характеристик. Конкурентные возможности плазмы обусловлены ее исключительными свойствами, которые проявляются благодаря наличию в ней множества степеней свободы, что, в конечном счете, и определяет ее технологические возможности и широкий спектр применения в технологии обработки поверхности конструкционного материала [1].

В 90-е годы прошлого века наблюдалось существенное повышение интереса к семейству вакуумно-плазменных технологий, получивших название плазменно-иммерсионных. По Андерсу [2], к плазменно-иммерсионным тех-

нологиям (ПИТ) относят способы обработки, осуществляемые при погружении обрабатываемого объекта в плазму и извлечении из плазмы на его поверхность активных энергетичных частиц. По этому признаку ранее известные способы обработки поверхности, такие как КИБ (конденсация с ионной бомбардировкой) [3] и IBAD (ионное ассистирование) [4], также могут быть отнесены к семейству плазменно-иммерсионных технологий.

Извлечение и ускорение частиц, бомбардирующих обрабатываемую поверхность, осуществляется наложением стационарного или импульсного электрического поля на границу плазма – обрабатываемый объект. Заметим, что к этому классу технологий можно отнести технологии, осуществляемые как при полном погружении объекта обработки в плазменную среду, так и при локальном взаимодействии плазмы с обрабатываемой поверхностью.

Характерные особенности плазменно-иммерсионной технологии. Охарактеризуем некоторые ключевые свойства ионно-иммерсионной технологии, обеспечивающие ее отличие и преимущества перед традиционными вакуумно-плазменными способами обработки поверхности.

Обработка поверхности в вакууме очень чувствительна к чистоте технологической среды относительно активных компонентов остаточной атмосферы технологического объема [5]. В практике применения технологии чистота относительно углеводородных загрязнителей обеспечивается использованием «безмасляных» средств вакуумной откачки. Возможность загрязнения области обработки активными газами может быть снижена проведением технологического процесса при пониженном давлении. Загрязнения поверхности, являющиеся результатом взаимодействия активных газовых компонентов с поверхностью обработки в реальном масштабе времени, обычно удаляются ионной бомбардировкой поверхности обработки энергетичными частицами. Энергетичные частицы генерируются вспомогательными источниками плазмы или извлекаются непосредственно из плазмы. Для этой цели, например при азотировании, для удаления препятствующих проведению процесса имплантации пленок оксидов и нитридов используются смеси плазмообразующих газов аргона и азота. В этом случае иммерсионная обработка имеет очевидные преимущества, так как не требует дополнительных технологических устройств для генерации энергетичных газовых ионов [6].

Обработка погружением обрабатываемого объекта в разреженную плазму несамостоятельного тлеющего разряда обеспечивает обработку объектов со сложной конфигурацией поверхности [7]. При этом толщина слоя плазмы у обрабатываемой поверхности не должна превышать параметр ее геометрической неоднородности. Проведение технологического процесса при давлении ($7{,}5\times10^{-3}$ – $7{,}5\times10^{-4}$) Торр позволяет понизить опасность загрязнения поверхности и интенсифицирует процесс азотирования высокоинтенсивной низкоэнергетичной имплантацией по сравнению с обработкой в самостоятельном тлеющем разряде при давлениях до 100 Торр.

Постановка задачи. Задачей настоящего исследования является исследование возможности создания оптимального аппаратурно-технического обеспечения комплексной технологии упрочнения наружных поверхностей пар трения. Рассматривались возможности построения комплексной технологии упрочнения пар трения деталей из титанового сплава двух различных типов. Это упрочнение наружной поверхности габаритной трубчатой детали

возвратно-поступательной пары трения и упрочняющая обработка малогабаритных сложнопрофильных деталей с характерным габаритным размером порядка (20 – 30) мм и с неоднородностями геометрии поверхности масштаба 1 мм.

Было принято, что комплексная технология плазменной обработки деталей такого типа должна включать следующие технологические переходы: ионная полировка рабочей поверхности с целью устранения технологической наследственности предшествующей механической обработки; ионная очистка и активация поверхности перед упрочнением; упрочнение высокоинтенсивной низкоэнергетичной имплантацией азота (ионным азотированием); улучшение триботехнических характеристик поверхности нанесением наноструктурного покрытия.

Ионно-лучевая технология локальной обработки габаритной детали. Магнетронное нанесения функционального покрытия на предварительно нагретую до 450˚С поверхность титановой детали сопровождается низкоэнергетичным слаботочным ассистированием ионной бомбардировкой [8]. При обработке детали из титанового сплава нами наблюдалось появление на обрабатываемой поверхности характерной цветной пленки. Пленка имела высокую твердость и механической полировкой не удалялась. Исследование причин возникновения пленки привело к следующим выводам. Пленка может появляться в результате полимеризации углеводородных загрязнений остаточной атмосферы вакуумной камеры (паров вакуумного масла) при активирующем влиянии бомбардировки низкоэнергетичными заряженными частицами плазмы. Полимеризация может активироваться также геттерными свойствами нагретой титановой поверхности. Это известные явления, описаны, например, в [9]. Избежать возникновения этих явлений возможно применением «безмасляной» вакуумной откачки, улучшением операционного вакуума или применением так называемого «скафандра». Скафандром обычно называют конструкцию для полугерметичного ограничения зоны плазменной обработки, в которой создается небольшое избыточное давление по отношению к основной вакуумной камере.

В дальнейшей работе нами был учтен максимум рекомендаций по предотвращению последствий применения «масляной» откачки, кроме требования отказа от самой «масляной» вакуумной откачки. Это объяснялось тем, что наши технологические разработки ориентированы на использование для модернизации промышленных вакуумных установок, оснащенных диффузионными насосами, определяющими «масляный» характер откачки.

В традиционных вакуумных технологиях для проведения предварительной обработки перед нанесением покрытий предпочтение отдается применению пучков энергетичных ионов, генерируемых автономными ионными источниками [10]. Для этих целей эффективны источники ионов с замкнутым дрейфом электронов. Например, ускоритель ионов с анодным слоем – УАС [11].

В [12] для поверхностной модификации в плазме была продемонстрирована перспективность метода низкоэнергетичной ионной имплантации.

Для нанесения наноструктурного функционального покрытия наиболее часто применяются магнетронные распылительные системы, работающие в стационарном или импульсно-периодическом сильноточном режиме – СИМР [13]. Особенности функционирования этих типов плазменных устройств оха-

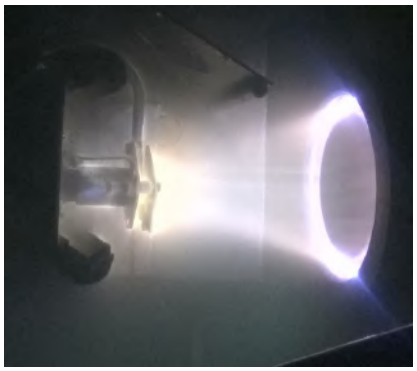
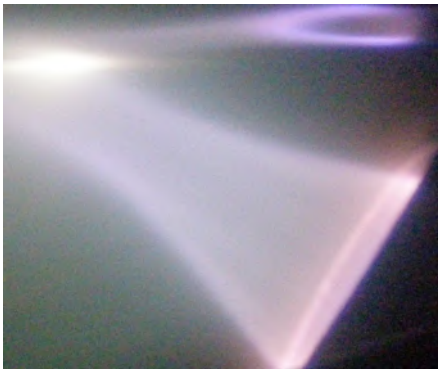
рактеризованы в значительном количестве публикаций [14], в том числе и в наших [15].

Кратко остановимся на особенностях конструкции технологической оснастки и технологических устройств, специально разработанных нами для проведения ионно-лучевой технологии обработки наружной поверхности.

Упрочнение габаритных деталей удобно производить способом локальной обработки при сканировании обрабатываемой поверхности относительно плазменных технологических устройств. Геометрические особенности деталей трубчатого типа допускали возможность организации ее предварительного нагрева резистивным нагревателем (ТЭН), который размещается во внутренней полости трубы.

Перед нанесением покрытия на полированные поверхности предварительной ионной обработкой часто пренебрегают, заменяя ее ультразвуковой внекамерной обработкой. В нашем случае предварительная обработка поверхности включала ионную полировку, что одновременно должно было обеспечивать ее очистку и активацию перед нанесением покрытия.

Ионная полировка поверхности производилась ионным источником типа УАС с разрядной ступенью диаметром 100 мм. Ширина межполюсного зазора магнитной системы ускорителя с ионным слоем (ширина разрядной камеры УАС) равнялась 5 мм. Повышение плотности ионного тока в области локальной обработки, имеющей диаметр 50 мм, достигалось использованием баллистической фокусировки ионного пучка. Фокусировка осуществлялась двухуровневым расположением полюсов магнитной системы относительно друг друга и использованием дополнительной магнитной фокусировки. На рисунке рис 1, а) показана обработка экспериментального образца сфокусированным пучком ионов. Для проведения ионной полировки наружной цилиндрической поверхности детали сфокусированный пучок ионов ориентировался под углом относительно обрабатываемой поверхности, как это показано на рисунке 1, б).

а)  б) 

а) плазменно-иммерсионное азотирование имплантацией ионов азота;
б) ионно-лучевая полировка наружной поверхности пары трения.

Рис. 1 – Ионно-лучевое устройство обработки наружной поверхности

Отличительным признаком питания разряда ионного источника было то, что ускоряющий ионы отрицательный потенциал подавался не на полюса магнитной системы, как это обычно предусматривается, а непосредственно на обрабатываемую деталь. В результате этого, в ускорителе происходила только ионизация рабочего газа и формировался ускоряющий анодный слой.

Такой способ подключения разрядного источника позволил улучшить стабильность анодного слоя в УАС-е и послужил основанием для квалификации используемого процесса ионно-лучевой обработки как плазменно-иммерсионного.

УАС устанавливался на расстоянии 130 мм от обрабатываемой поверхности. Участок обрабатываемой поверхности бомбардировался сфокусированным пучком газовых ионов, имеющих энергию не менее половины разрядной разности потенциалов, приложенной между анодом УАС и объектом обработки (~1500 эВ). Средняя плотность ионного тока на подложке составляла ~10 мА/см^2. Поток ускоренных ионов обеспечивал ионную полировку, ионную очистку и активацию поверхности перед нанесением покрытия.

Для модификации поверхностных свойств подложки ионно-лучевым азотированием использовались энергетичные ионы чистого азота или смесь аргона с азотом в различных пропорциях.

Нанесение наноструктурного покрытия после ионно-лучевой обработки обеспечивалось модернизированным планарным несбалансированным магнетроном с хромовым катодом диаметром 50 мм. Несбалансированность магнитной системы модернизированной планарной магнетронной распылительной системы ПлНбМРС50 обеспечивалась предельным увеличением магнитного потока через наружный магнитопровод магнитной системы магнетрона. Подача аргона в разряд осуществлялась непосредственно в промежуток между катодом и анодом. Эта мера обеспечивала снижение рабочего давления в вакуумной камере до величины $(7 – 8)\times10^{-4}$ Торр.

Предварительный нагрев детали до 450˚С производился внутренним резистивным нагревателем мощностью 1 кВт. Нагрев детали массой 6,5 кг происходил за 20 минут. Мощность разряда магнетрона в рабочем режиме составляла (2 – 2,5) кВт. Энергетическая эффективность распыления хрома равнялась 0,03 мГ/А×мин. По некоторым показателям рабочего процесса разработанный магнетрон превышал показатели аналогичного магнетрона типа ONIX [16].

Ионно-плазменная система для комплексной локальной плазменно-иммерсионной обработки наружной поверхности. Очевидным недостатком интегрированного технологического устройства, включающего источник плазмы УАС и магнетронную распыляющую систему ПлНбМРС50, является его громоздкость. Применение в экспериментах предварительной ионной полировки с помощью УАС не продемонстрировало явного улучшения качества упрочняющей обработки. Ожидаемое улучшение усталостной долговечности детали требует длительных испытаний натурной детали и не приводит к быстрым выводам о целесообразности использования предварительной ионной полировки. От применения УАС при обработке наружной поверхности в нашем случае было решено отказаться.

Был разработан технологический процесс проведения всех технологических переходов локальной ионно-плазменной обработки наружной цилиндрической поверхности при использовании одного плазменного технологического устройства – ПлНбМРС50.

В результате сильной несбалансированности магнитной системы магнетрона в пространстве между его катодом и подложкой создавалась область с продольным магнитным полем. При приложении к подложке отрицательного смещения в этом объеме формировалась пучковая плазма. На рисунке 3 пока-

зана картина магнитного поля в этом объеме. На рисунке 4 видно, что область пучковой плазмы занимает все пространство между магнетроном и обрабатываемой поверхностью и имеет выраженные границы.

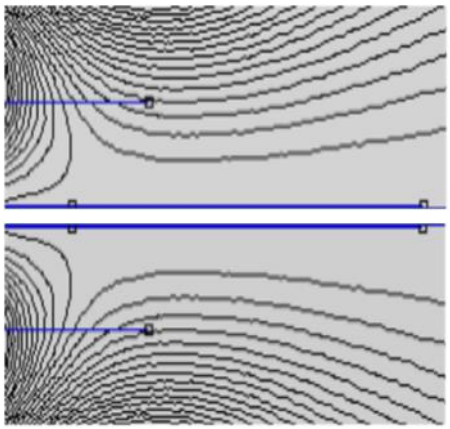


Рис. 2 – Картина магнитного поля

Рис. 3 – Локальная обработка в несбалансированном магнетроне пучковой плазмой

Интенсивность пучковой плазмы выбиралась достаточной для извлечения из нее ионов с энергиями, необходимыми для проведения предварительной ионной обработки и для высокоинтенсивной низкоэнергетичной имплантации. Энергетические характеристики извлекаемого из пучковой плазмы потока газовых ионов определялись величиной потенциала смещения на обрабатываемой детали.

Следует оговориться, что разработанный способ упрочняющей обработки локальным плазменно-иммерсионным способом в пучковой плазме является объектно-ориентированным. Процесс оптимален при обработке протяженных деталей трубчатого типа и ограниченно пригоден для обработки деталей другого типа. Более универсальным по применению является технология плазменно-иммерсионной обработки, реализуемая при полном погружении обрабатываемого изделия в плазменную среду.

Интегрированная система для комплексной плазменно-иммерсионной групповой обработки малогабаритных деталей. Универсальность обработки в объемном тлеющем разряде, заполняющем всю вакуумную камеру, характеризуется тем, что она обеспечивает групповую обработку деталей объемной конфигурации с развитым рельефом наружной поверхности.

Создание плазменной среды в большем технологическом объеме при давлениях порядка $(7 – 8)\times10^{-4}$ Торр имеет свои особенности по сравнению с обработкой в пучковой плазме.

При проведении плазменно-иммерсионной обработки с полным погружением детали в плазму разряда обеспечивается непосредственный контакт с плазмой всей обрабатываемой поверхности. Плазма тлеющего разряда является источником заряженных частиц, выполняющих энергетическое воздействие на поверхность. Ионы извлекаются из плазмы отрицательным потенциалом смещения, приложенным к обрабатываемой детали относительно потенциала плазмы. Трудности использования для поверхностной обработки тлеющего разряда нормального типа заключаются в том, что устойчивая форма разряда может существовать при повышенном давлении (порядка

100 Торр) или при приложении высокого разрядного напряжения. В этих условиях, из-за малой длины пробега частиц в прикатодном слое, при повышенном давлении, энергетика технологического процесса понижается, что существенно влияет на производительность технологического процесса. Примером тому может служить распространенный в современной технологической практике процесс ионного азотирования [17]. Другим отрицательным моментом при использовании самостоятельного разряда являются трудности поддержания чистоты низкого вакуума.

Учитывая особенности нормального тлеющего разряда, при организации поверхностной ионно-плазменной обработки предпочтение отдается несамостоятельной форме тлеющего разряда. Это позволяет существенно улучшить вакуум (до давлений от $7{,}5\times10^{-3}$ Торр до $7{,}5\times10^{-4}$ Торр) и приводит к соответствующему повышению энергетики ионной компоненты и производительности обработки.

Возбуждение тлеющего разряда при повышенном разрежении невозможно без использования внешнего источника электронов.

Известны примеры использования несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления в устройствах для формирования ионных или электронных пучков. Это создание плазмы в газоразрядной камере ионно-плазменного сеточного источника ионов [18, 19] или в плазменном эмиттере электронов для широкоапертурной электронной пушки [20, 21].

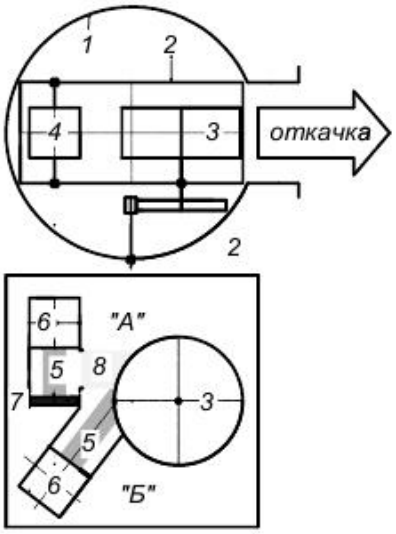
В качестве источника первичной плазмы, из которой извлекаются электроны, в технологических установках с несамостоятельным тлеющим разрядом используется вакуумно-дуговой разряд [3] или термоэмиссионный источник электронов в сочетании с полым катодом [21].

Большинство разработанных конструкций интегрированных плазменных источников электронов выполняется по аксиальной тандемной схеме («друг-за-другом»), что увеличивает габариты конструкции. Примеры извлечения электронов из плазмы разряда в радиальном направлении и использование для этих целей планарных магнетронных устройств нам не известны.

Для осуществления групповой плазменно-иммерсионной обработки нами были разработаны предложения по модернизации промышленной ионно-плазменной установки типа «Булат». Установки этого типа имеют водоохлаждаемую рабочую камеру диаметром 500 мм и длиной 500 мм. Вакуумная откачка рабочей камеры обеспечивается паромасляным высоковакуумным насосом. Масляная откачка порождает проблемы чистоты технологической среды, которые были упомянуты выше.

Была поставлена задача использования разработанного планарного магнетронного устройства ПлНбМРС50 как для нанесения покрытия, так и для предварительной генерации газовой плазмы в интегрированном широкоапертурном источнике электронов. Поток электронов должен извлекаться в радиальном направлении из полого катода, который предварительно заполняется пучковой плазмой, генерируемой планарным магнетроном.

Конструктивная схема интегрированного плазменного устройства представлена на рисунке 4. Для предотвращения загрязнения обрабатываемых поверхностей компонентами остаточной атмосферы в вакуумной камере 1 установки «Булат» устанавливался полугерметичный технологический объем 2 – «скафандр». В полости «скафандра» располагался планетарный подложкодержатель 3 и интегрированное плазменное технологическое устройство 4.



1 – вакуумная камера установки «Булат»; 2 – полугерметичный технологический объем – «скафандр»; 3 – планетарный подложкодержатель; 4 – технологическое интегрированное плазменное устройство; 5 – трубчатое электродное устройство; 6 – порты вакуумной камеры; 7 – магнетронное устройство ПлНбМРС50; 8 – антикатод трубчатого электродного устройства; 9 – окно с сеточным ускоряющим электродом.

Рис. 4 – Конструктивная схема интегрированного плазменного устройства для групповой плазменно-иммерсионной обработки мелких деталей

Для проведения плазменно-иммерсионной обработки во вспомогательном технологическом объеме возбуждался несамостоятельный тлеющий разряд. Возбуждение разряда происходило при инжекции электронов, извлекаемых из области пучковой плазмы.

Предварительная обработка производилась последовательным применением нагрева и активации поверхности обрабатываемых деталей электронной или ионной бомбардировкой.

Энергетичные частицы вытягивались из области пучковой плазмы. Затем производилась плазменно-иммерсионная высокоинтенсивная низкоэнергетичная имплантации азота. Заключительной операцией обработки является ионно-плазменное нанесение наноструктурного функционального покрытия.

В разработанной нами установке, как и в аналогичной по назначению установке [22], для нанесения покрытия используется планарный магнетронный распылитель несбалансированного типа. Этот же магнетрон ПлНбМРС50 используется для генерации электронного пучка, инициирующего несамостоятельный тлеющий разряд. В [22] для возбуждения несамостоятельного тлеющего разряда в большом объеме используется плазменный генератор с термоэмиссионным эмиттером электронов и полым катодом. Генератор этого типа характеризуется высокой функциональной эффективностью, но использование термоэмиссионного вольфрамового катода сильно ухудшает его эксплуатационный ресурс.

В разработанной нами конструкции, представленной на рисунке 4, в конструкции плазменного технологического блока 4 предусматривается использование двух одинаковых симметрично расположенных технологических

плазменных устройств 5. Вертикальная плоскость симметрии делит вакуумную камеру установки на две равные части. Доступ в каждую часть возможен через соответствующие порты вакуумной камеры 6. Каждое технологическое устройство включает генератор пучковой плазмы – магнетрон 7 и состыкованное с ним через изолятор трубчатое электродное устройство 5. Магнитные полюса магнетронов имеют ориентацию, противоположную друг другу. Электродное устройство смонтировано в короткой 100 мм нержавеющей трубе. Блок магнетрон – электродное устройство устанавливается с возможностью поворота вокруг вертикальной оси. Открытые концы обеих трубчатых электродных устройств при установке в положении «А» ориентируются напротив неподвижного графитового антикатода 9. С целью снижения генерации распыленных частиц, катод магнетрона и антикатод изготавливаются из графита, имеющего низкий коэффициент ионного распыления. Аналогичная цель достигалась также использованием в качестве плазмообразующего газа легкого гелия.

В боковой поверхности трубы имеется окно 9 размером 80 мм на 30 мм. Окно закрыто сетчатым, изолированным от трубы ускоряющим электродом. В положении «А» через обращенный в сторону подложкодержателя сетчатый электрод извлекаются и ускоряются к подложке энергетичные частицы.

При повороте электродного устройства на некоторый угол в положение «Б» катод магнетрона ориентируется на планетарный подложкодержатель в положение нанесения покрытия.

Графитовый антикатод находится под отрицательным потенциалом относительно анода магнетрона. На сетчатый электрод подается ускоряющий потенциал относительно пучковой плазмы.

В полости трубы электродного устройства создается пучковая плазма. Между сетчатым электродом и границей пучковой плазмы формируется двойной электрический слой. Через отверстия сетки, в зависимости от знака ее потенциала, из пучковой плазмы могут извлекаться электроны или ионы. Поток заряженных частиц используется для нагрева, очистки деталей и для инициирования несамостоятельного тлеющего разряда в «скафандре».

В полости «скафандра» создается несамостоятельный тлеющий разряд. В разреженную плазму тлеющего разряда погружен подложкодержатель с обрабатываемыми деталями. На подложкодержатель в стационарном или импульсном режиме подается отрицательный относительно плазмы разряда ускоряющий потенциал.

Для интенсификации процесса нанесения покрытия может использоваться схема дуального магнетрона [4]. В этом случае в области обработки, благодаря противоположно ориентированным магнитным полюсам магнетронов, создается общее магнитное поле. Это позволяет повысить плотность плазмы в области нанесения покрытия. Кроме того, использование в магнетронах различных распыляемых катодных материалов открывает возможность нанесения композитных двухкомпонентных покрытий.

Результаты экспериментов. Производилось сравнение характеристик обработки ионно-лучевым способом и плазменно-иммерсионным. Ионно-лучевая обработка производилась с помощью источника плазмы УАС. Плазменно-иммерсионный способ локальной высокоинтенсивной низкоэнергетичной имплантации был реализован с помощью пучковой плазмы, генери-

руемой магнетроном ПлНбМРС50. При обработке материал катода ПлНбМРС50 соответствовал материалу обрабатываемого образца.

Экспериментальные образцы размером 40 мм на 40 мм вырезали из листа полированной нержавеющей стали AISI321 (12Х18Н10Т) толщиной 2 мм. Исходная твердость поверхности образца равнялась 170 МПа. Нагрев образцов до рабочей температуры производился ионной бомбардировкой. При бомбардировке потоком ионов с плотностью мощности (15 ÷ 17) Вт/см^2, образец нагревался до 480˚С за 5 минут. Температура контролировалась термопарой.

В [23] было показано, что для достижения структурных превращений в обрабатываемой подложке, для преобразования межкристаллитных границ и образования вторичных фаз в поверхности металла, энергия бомбардирующих поверхность энергетичных ионов должна быть не менее 1 кэВ при дозе ионного облучения от 10^{20} см$^{-2}$ до 10^{21} см$^{-2}$. При этом величина плотности мощности потока ионов должна находиться в диапазоне от 3 Вт/см^2 до 12 Вт/см^2.

При обработке образца 12Х18Н10Т ускоренными в УАС ионами азота режим УАС (ускоряющее напряжение – 2,8 кВ, ионный ток на подложку – 60 мА) поддерживался 1 час. При этом флюенс (доза облучения) был порядка 5×10^{20} см$^{-2}$. Величина микротвердости азотированной поверхности достигала 1250 кг/мм^2. Шероховатость поверхности полированного образца после обработки визуально ухудшилась. О толщине слоя азотирования судили по величине диагонали отпечатка индентора прибора ПМТ3. Эта величина должна составлять не более 0,1 от толщины измеряемого упрочненного слоя.

Режим обработки образца пучковой плазмой выдерживался примерно на том же уровне, что и при обработке УАС. При режиме магнетрона 500 В, 500 мА, образец подвергался бомбардировке ионами азота при смещении 1900 В, при плотности ионного тока 4 мА/см^2. В этом режиме за 20 минут достигался флюенс 3×10^{19} см$^{-2}$, за 30 минут – $4{,}5\times10^{19}$ см$^{-2}$, за час – примерно 10^{20} см$^{-2}$. При облучении за время 30 минут микротвердость поверхности образца возрастала от исходной твердости до примерно HV_{100} = 1250 кг/мм^2 . При уменьшении времени ионного облучения микротвердость пропорционально уменьшалась. При флюенсе 5×10^{19} HV_{100} = 650 кг/мм^2. Особенностью обработки является распыление поверхностного слоя образца за счет бомбардировки энергетичными газовыми ионами. При этом параметр шероховатости образца ухудшался. Распыление поверхности образца не компенсируется конденсацией материала аналогичного состава с катода магнетрона.

Результаты локальной обработки ионно-лучевым способом с помощью ионного источника УАС и локальная обработка с использованием пучковой плазмы оказались практически идентичными.

Отработка конструкции для создания несамостоятельного тлеющего разряда производилась в вакуумной камере установки ВУП- 5М объемом 20 л. Экспериментальные условия малой вакуумной камеры не позволили проведение длительного технологического процесса плазменно-иммерсионной обработки из-за недопустимого нагрева неохлаждаемой вакуумной камеры. Достижение параметров плазмы, необходимых для плазменно-иммерсионной обработки в этих экспериментальных условиях, оказалось невозможным.

Заключение. В работе были рассмотрены причины «отравления» поверхности титановых деталей при плазменной обработке с низкоэнергетичным слаботочным ионным ассистированием. Установлено, что основными

причинами является наличие паров вакуумного масла в остаточной атмосфере вакуумной камеры. Геттерные свойства титана, проявляющиеся при температуре 450˚С, и взаимодействие углеводородных компонентов остаточной атмосферы вакуумной камеры с разреженной низкоэнергетичной плазмой способствовали возникновению полимеризованных пленок, которые загрязняли обрабатываемую поверхность.

Для устранения обнаруженных особенностей использовалась обработка локальным взаимодействием интенсивной пучковой плазмы с обрабатываемой поверхностью. Подобные режимы были реализованы и в объемной плазме несамостоятельного тлеющего разряда.

Основной задачей настоящей работы являлась демонстрация возможности использования магнетронного генератора плазмы для упрочняющей обработки двух типов деталей. Комплексная технология упрочняющей обработки включала предварительную ионную обработку поверхности, вакуумно-иммерсионную модификацию поверхности интенсивной ионной низкоэнергетичной имплантацией и ионно-плазменное нанесение наноструктурного функционального покрытия. Для осуществления комплексной технологии упрочнения двух типов деталей разработаны два различных типа плазменных технологических устройств.

Первый тип устройства предназначался для локальной комплексной технологии обработки наружной поверхности габаритной трубчатой детали. Этот тип устройства на основе ПлНбМРС50 был ориентирован только на плазменно-иммерсионную обработку габаритных деталей трубчатого типа.

Второй тип устройства отличался универсальностью применения и предназначался для групповой комплексной технологии упрочнения рабочих поверхностей малогабаритных деталей с развитой наружной поверхностью. Плазменное технологичное устройство второго типа включало, кроме ПлНбМРС50, широкоапертурный источник электронов. Это технологическое устройство обеспечивало выполнение всех переходов плазменно-иммерсионной обработки.

Оба типа плазменных технологических устройств продемонстрировали функциональную работоспособность при выполнении соответствующих технологических операций. В перспективе планируется проведение оптимизации параметров технологических процессов. С этой целью будут выполнены исследования локальных характеристик технологических устройств и изучено их влияние на эффективность технологии комплексной упрочняющей обработки.

1, *Морозов А. И.* Введение в плазмодинамику. М.: Физматлит. 2006. 576 с.
2. *Anders Andre*. From Plasma Immersion Ion Implantation To Deposition: A Historical Perspepective on Principles and Trends. URL:https://www.semanticscholar.org/paper/
3. *Аксенов И. И., Андреев А. А., Белоус А.* и др. Вакумная дуга. Источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование. Киев: Наукова думка, 2012. 727 с.
4. *Свадковский И. В.* Направления развития магнетронных распылительных систем. Доклады БГУИР. 2007. № 2(18). С. 112–121.
5. *Ивановский Г. Ф., Петров В. И.* Ионно-плазменная обработка материалов. М.: Радио и связь, 1986. 232 с.
6. *Карпов Д. А., Литуновский В. Н.* Плазменно-иммерсионная ионная имплантация (ПИИИ): физические основы, использование в технологиях. СПб.: ФГУП “НИИЭФА им. Д.В. Ефремова”, 2009. 62 с.
7. *Levchuk D.* Plasma assisted techniques for deposition of superhard nanocomposite coatings. 2007. Vol 201. P. 6071–6077. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.08.113
8. *Данилин Б. С., Киреев В. Ю.* Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 263 с.

9. *Габович М. Д., Плешивцев Н. П., Семашко Н. Н.* Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. М.: Энергоатомиздат, 1986. 248 с.
10. *Маишев Ю. П., Виноградов М. И.* Вакуумные процессы и оборудование ионно- и электронно-лучевой технологи. М.: Машиностроение, 1989. 56 с.
11. *Белый А. В., Кукареко В. А., Лободаева О. В.* и др. Ионно-лучевая обработка металлов, сплавов и керамических материалов. Минск: ФТИ, 1998. 218 с.
12. Method and apparatus for magnetically enhanced sputtering: Patent US 6296.742: МПК C23C14/35; H01J37/34; H03K3/57 / *Kouznetsov Vladimir*. US19990393294; 19990910; 02.10.2001.
13. *Кузьмичев А. И.* Импульсные магнетронные распылительные системы. Сб. трудов Харьковской научной ассамблеи ISTFE-14. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2014. С. 221–244.
14. *Гришкевич А. Д., Гринюк С. И., Кучугурный Ю. П.* Технологические плазменные устройства на основе разряда с замкнутым дрейфом электронов. Техническая механика. 2013. №4. С. 43–57.
15. *Рогов А. В., Капустин Ю. В., Мартыненко Ю. В.* Факторы, определяющие эффективность магнетронного распыления. Критерии оптимизации. ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 2. С. 126–134. https://doi.org/10.1134/S1063784215020206
16. *Арзамасов Б. Н. Братухин Б. Н., Елисеев Ю. С. и др.* Ионная химико-термическая обработка сплавов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 400 с.
17. *Штулингер Э.* Ионные двигатели для космических полетов. М: Воениздат, 1966. 343 с.
18. *Гончаров Л. А., Григорьян В. Г.* Источники ионов для операций ионно-лучевой технологи. Прикладная физика. 2007. № 5. С. 67–70.
19. *Окс Е. М.* Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. Томск: Изд-во НТЛ, 2005. 216 с. https://doi.org/10.1002/3527609415
20. *Гаврилов Н. В., Меньшаков А. И.* Влияние параметров электронного пучка и ионного потока на скорость плазменного азотирования аустенитной нержавеющей стали. Журнал технической физики. 2012. Т. 82. Вып. 3. С. 88–93. https://doi.org/10.1134/S1063784212030073
21. *Борисов Д. П., Детистов К. Н., Ежов В. В. и др.* Вакуумный технологический комплекс «Спрут» для формирования высококачественных упрочняющих поверхностных структур изделий плазменными магнетронно-дуговыми методами. 8-я международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 23–25 сентября 2009 г., Минск, Беларусь. С. 299–301.
22. Способ упрочнения изделий из металлов: патент РФ № 2070607: МПК C23C8/36 / *Атаманов М. В., Веселовзоров А. Н., Гордеева Г. В., Гусева М. И., Дергачев В. А., Неумоин В. Е., Погорелов А. А.* 92014611/02; заявл. 25.12.1992; опубл. 20.12.1996.

Получено 13.05.2019,
в окончательном варианте 20.09.2019