

## РАЗРАБОТКА ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

*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 розробка плазмових технологічних пристроїв і їх комбінацій для використання в технологічній установці, що призначена для проведення комбінованого технологічного процесу зміцнення робочих поверхонь металевих деталей. При розробці технологічної установки дотримувались вимоги відповідності всіх її складових критеріям прогресивності при умові компонування технологічних пристроїв в межах робочої камери стандартної вакуумної установки. Розглянуто особливості конструкції і функціонування технологічних плазмових пристроїв, які побудовані на використанні фізичних ефектів взаємодії концентрованих потоків енергії з поверхнею. Для проведення іонно-променевої і іонно-плазмової обробки внутрішніх і зовнішніх поверхонь деталей розроблено, виготовлено і випробувано декілька моделей автономних іонних джерел і магнетронних розпилюючих систем. Розглянуто особливості функціонування і практичного використання різних конструктивних схем побудови вакуумно-плазмової установки для обробки деталей різних конфігурацій. Вироблено рекомендації щодо оптимального складу технологічних пристроїв і конструктивних схем вакуумно-плазмової установки для проведення комбінованої обробки деталей з внутрішніми і зовнішніми робочими поверхнями.

Целью работы является разработка плазменных технологических устройств и их комбинаций для использования в технологической установке, предназначенной для проведения комбинированного технологического процесса упрочнения рабочих поверхностей металлических деталей. При разработке технологической установки выполнялись требования соответствия всех ее составляющих критериям прогрессивности при условии компоновки технологических устройств в пределах рабочей камеры стандартной вакуумной установки. Рассмотрены особенности конструкции и функционирования технологических плазменных устройств, построенных с использованием физических эффектов взаимодействия концентрированных потоков энергии с обрабатываемой поверхностью. Для проведения ионно-лучевой и ионно-плазменной внутренних и внешних поверхностей деталей разработано, изготовлено и испытано несколько моделей автономных ионных источников и магнетронных распылительных систем. Рассмотрены особенности функционирования и назначения различных конструктивных схем построения вакуумно-плазменной установки для обработки деталей различных конфигураций. Выработаны рекомендации по оптимальному составу технологических устройств и конструктивных схем вакуумно-плазменной установки для проведения комбинированной обработки деталей с внутренними и наружными рабочими поверхностями.

The aim of this work is to develop plasma process devices and combinations thereof for the use in a process plant for the implementation of a combined process of metal parts working surface strengthening. All the component parts of the process plant meet progressivity criteria and can be mounted in the working chamber of a standard vacuum plant. Consideration is given to the features of the design and operation of plasma process devices constructed with the use of physical effects of the interaction of concentrated energy fluxes with the surface under treatment. To conduct ion-beam and ion-plasma treatment of the outer and inner surfaces of parts, several models of self-contained ion sources and magnetron sputtering systems have been developed, made, and tested. Consideration is given to the features of the functioning and destination of different construction arrangements of a vacuum-plasma plant for treatment of variously shaped parts. Recommendations are formulated on the choice of the optimum composition of process devices and construction arrangements of the vacuum-plasma plant for combined treatment of parts with inner and outer working surfaces.

**Ключевые слова:** *комбинированная технология, ионно-плазменная технология, ионно-лучевая технология, магнетронная распыляющая система, ускоритель с анодным слоем.*

Введение. В предыдущей нашей статье [1] был обоснован выбор способов улучшения прочностных и усталостных характеристик контактирующих поверхностей силового титанового гидроцилиндра. В качестве базовой была выбрана комбинированная плазменная технология, включающая ионную полировку, ионно-лучевое азотирование и нанесение наноструктурированного антифрикционного покрытия. Настоящая статья посвящена разработке конструкции и исследованию рабочих характеристик плазменных технологи-

ских устройств для осуществления выбранной технологии.

Отличительным признаком плазмы как технологической среды является повышенная активность ее компонентов, находящихся в возбужденном или ионизованном состоянии. В производственных условиях практически единственным источником плазмы является электрический разряд в вакууме или разреженном газе. Для решения наших задач из всего многообразия типов разрядов нами выбран разряд с замкнутым дрейфом электронов – РЗДЭ (разряд в скрещенных  $E \times H$  полях) [2, 3]. Этот разряд отличает высокая эффективность ионизации и универсальность плазменных устройств для осуществления ионно-плазменной и ионно-лучевой технологии обработки поверхности, созданных на его основе.

В ионно-плазменной технологии плазма является технологической средой, которая может заполнять весь технологический объем или создается вблизи обрабатываемой поверхности. Эта технология оптимальна для поверхностной обработки деталей сложной формы и характеризуется повышенной производительностью. В качестве ее недостатка необходимо отметить относительно низкий уровень энергии взаимодействия плазмы с обрабатываемой поверхностью и высокие требования к вакуумным условиям, трудноосуществимые в производственных условиях. Типичная область применения ионно-плазменной технологии – генерация потока частиц материала покрытия в магнетронных распыляющих устройствах (МРС) и плазменная активация диффузионных процессов обработки поверхности при оксидировании, азотировании, т. пр.

Ионно-лучевая технология основана на взаимодействии потока энергетических ионов с обрабатываемой поверхностью. Технология характеризуется повышенной энергетикой взаимодействия, более низкими, по сравнению с ионно-плазменной технологией, требованиями к вакуумным условиям, а также локальностью обработки. Оптимальная область применения – локальная обработка и обработка поверхностей простой геометрии. Основным назначением ионно-лучевых технологических устройств является создание плазмы в малом объеме, извлечение из плазмы ионов для формирования и ускорения направленного потока (пучка) высокоэнергетических ионов, транспортировка пучка к обрабатываемой поверхности, обработка поверхности ионным распылением. Ионно-лучевые технологические устройства, как правило, обеспечивают предварительную очистку, активацию обрабатываемых поверхностей и ионное ассистирование процесса конденсации покрытия. Ионно-лучевые устройства сравнительно малой мощности обладают уникальной возможностью проведения низкоэнергетической высокоинтенсивной имплантации газовых ионов (ионно-лучевой имплантации).

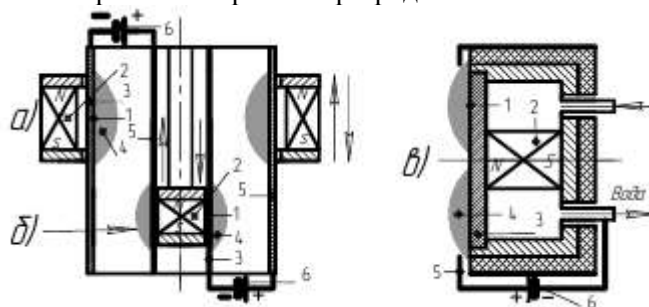
**Физические основы ионно-плазменных технологических устройств на основе разряда с замкнутым дрейфом электронов.** На качественном уровне рассмотрим основные особенности функционирования ионно-плазменных устройств на основе РЗДЭ. Эта информация необходима при проектировании технологических устройств и при оптимизации соответствующих технологических процессов. Информация изложена на основе собственного опыта и в результате систематизации сведений, полученных из монографий и публикаций в периодических изданиях.

РЗДЭ используется для ионизации рабочего газа, формирования и ускорения ионных потоков. Потоки энергетических газовых ионов используются

для распыления поверхности твердого тела и для непосредственного технологического воздействия на обрабатываемую поверхность. Ионное распыление – наиболее востребованная технологическая функция РЗДЭ. Это явление подробно рассматривается в монографиях [4, 5].

Для нанесения покрытий различного состава и назначения широко используются магнетронные распылительные системы (МРС), использующие явление ионного распыления. Физические процессы и особенности технологического применения МРС подробно рассмотрены в монографиях [6, 7, 8] и во множестве научно-технических статей.

В магнетронном распылительном устройстве магнитное поле, необходимое для существования РЗДЭ, создается в замкнутом межполюсном зазоре 1 магнитной системы 2 (см. рис. 1). Магнитные полюса могут иметь плоскую (планарную), как показано на рис. 1, в) или цилиндрическую, как показано на рисунках 1, а) и 1, б), форму. Над поверхностью магнитных полюсов располагается водоохлаждаемый катод-мишень разряда 3. Область сильного магнитного поля 4 над поверхностью катода имеет арочную конфигурацию. Величина магнитного поля на поверхности катода выбирается такой, чтобы ларморовский радиус электрона в разряде был существенно меньше характерного размера магнитной арки. В МРС величина магнитного поля находится в пределах (40÷100) мТл. В области разряда магнитное поле спадает в  $n$  раз на расстоянии от катода, примерно равном ширине межполюсного зазора. Положительный электрод 5 – анод магнетронного разряда – охватывает область локализации РЗДЭ и располагается за его пределами на минимальном удалении от магнитных полюсов. Рабочий газ (обычно аргон) подается в МРС со стороны катода или непосредственно в вакуумную камеру. В такой конфигурации в разрядной ячейке создаются скрещенные электрическое и магнитное поля и горит магнетронный разряд.



а) цилиндрический инверсный распылитель - ИнваЦМРС; б) цилиндрический распылитель - ЦМРС; в) планарный распылитель - ПлМРС.

1 – межполюсной зазор; 2 – магнитная система; 3 – катод; 4 – область магнетронного разряда; 5 – анод; 6 – источник питания.

Рис. 1 – Принципиальные схемы магнетронных распылителей

В последнее время распространение получили МРС с импульсным типом разряда, т. н. ИРИМС или СИМР. Этот тип разряда позволяет получать высококачественные наноструктурированные керамические покрытия. Особенности импульсных магнетронов рассматриваются, в частности, в [9, 10]. В нашей работе не предполагалось применение керамических покрытий и предпочтение отдано более простому и надежному типу МРС с разрядом на постоянном токе.

Магнетронный разряд является аномальной разновидностью тлеющего разряда и отличается от него наличием в разрядной ячейке магнитного поля ортогонального электрическому. Эффективность ионизации рабочего газа, происходящей в прикатодной области разряда, повышается с повышением величины магнитного поля. В результате этого уменьшается радиус орбиты электрона, удерживаемого в этом поле. Тем самым, за счет увеличения времени нахождения электрона в области разряда, повышается вероятность ионизации рабочего газа. Под действием силы Лоренца электроны в разряде совершают азимутальный дрейф вдоль распыляемой поверхности катода-мишени, двигаясь по циклоидальным траекториям. В области разряда электроны находятся как бы в «магнитной ловушке», за счёт чего ионизация многократно возрастает. Это обеспечивает высокую плотность тока в разряде, а значит, и высокую скорость распыления материала катода при низких (ниже 0,5 Па) давлениях рабочего газа. Повышение концентрации электронов в «ловушке» эквивалентно повышению давления газа.

Замагниченность электронной компоненты разрядной плазмы создает в прикатодной области тонкий слой объемного заряда, в котором падает до 80 % разрядного напряжения и ионы, бомбардирующие катод, приобретают соответствующую энергию. В результате ионной бомбардировки катода возникает ионно-электронная эмиссия, поддерживающая существование разряда. В типичных условиях магнетронного разряда ионно-электронная эмиссия (т. н.  $\gamma$ -эмиссия) составляет 10 % от тока магнетронного разряда

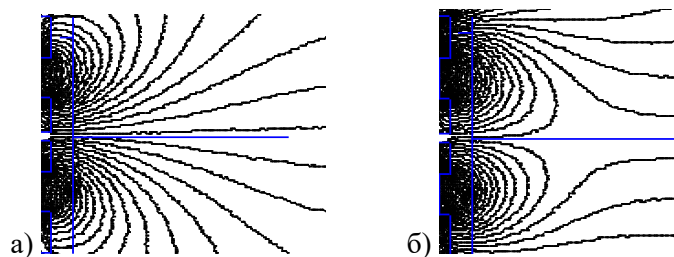
Эффективность РЗДЭ характеризуется его вольтамперной характеристикой. При работе МРС на постоянном токе вольтамперная характеристика магнетронного разряда имеет вид степенной зависимости тока от напряжения разряда. При этом показатель степени рассматривается как мера эффективности удержания электронов в «ловушке». Значение показателя степени изменяется от 1 до 20 в зависимости от материала катода, величины и формы приложенного магнитного поля, давления газа, положения анода и др.

**Ионное ассистирование в магнетронных распылительных устройствах.** В [11, 12] было установлено, что низкоэнергетичная ионная бомбардировка растущего покрытия позволяет активно управлять процессом формирования его структурно-фазового состояния. Эта зависимость обеспечивает условия для получения покрытий с заданными физико-механическими характеристиками. Величина отношения потока ионов на подложку к потоку осаждаемого материала является одним из основных параметров, определяющих эффективность этого процесса, именуемого «ионным ассистированием».

Ионное ассистирование наиболее эффективно при использовании автономного источника низкоэнергетичных ионов (АИИ). При этом возможно независимое управление плотностью и энергией ионов, что открывает дополнительные возможности влияния на структуру покрытия. Однако такая организация ионного ассистирования усложняет конструкцию технологического оборудования и не всегда осуществима из-за несовпадения оптимальных значений давления рабочего газа для МРС и АИИ.

В [13] были определены условия организации ионного ассистирования без использования автономного ионного источника. Изменением конфигурации магнитного поля в МРС возможно создание условий для выхода части электронов из области разряда. Идеальная магнитная ловушка, обеспечива-

ющая максимальную эффективность ионизации в разряде МРС, характеризуется равенством магнитных потоков через полюса магнитной системы. Картина магнитного поля в такой магнитной системе МРС показана на рисунке 2, а). При превышении магнитного потока через внешний полюс магнитной системы образуется так называемая «несбалансированность» магнитного поля, которая приводит к разрыву магнитной ловушки в районе центрального магнитного полюса (см. рис. 2, б)).



а) – сбалансированное поле; б) несбалансированное поле.

Рис. 2 – Картина магнитного поля в планарном магнетроне.

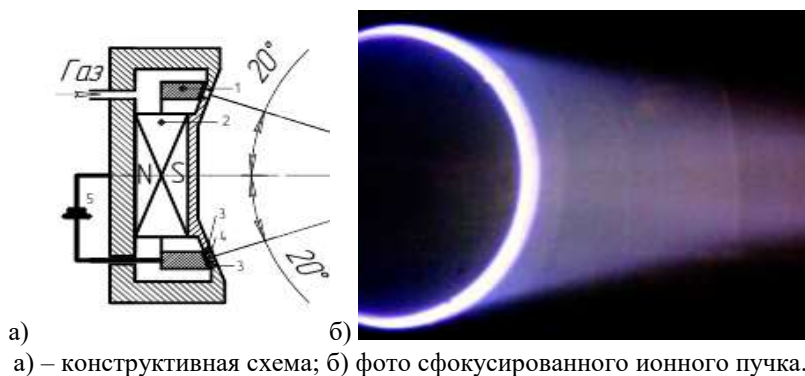
Несбалансированность магнитного поля достигается усилением источника поля внешнего полюса или установкой дополнительной магнитной катушки, охватывающей МРС и (или) пролетную область между МРС и подложкой. При подаче на подложку небольшого отрицательного потенциала электроны из области разряда устремляются за пределы ловушки. За счет амбиполярной диффузии за электронами устремляются ионы, которые и бомбардируют подложку. Энергия ассистирующих ионов определяется величиной отрицательного смещения на подложке. Эта зависимость позволяет организовать ионную подготовку поверхности конденсации подачей на подложку повышенного напряжения. В результате возникает возможность проведения ионной очистки, нагрева и активации поверхности подложки без помощи дополнительных устройств. При такой организации ионного ассистирования имеется недостаток, который определяется несовпадением области ионной бомбардировки и области конденсации покрытия. Это несовпадение особенно проявляется при малых дистанциях напыления и ослабевает при значительном удалении подложки от МРС. В [14] нами было определено, что несбалансированность магнитного поля приводит к некоторому снижению удельных характеристик разряда. По этой причине способы организации ионного ассистирования с применением дополнительной магнитной катушки или АИИ имеют предпочтение, что актуализует разработку АИИ, совместимого с МРС по величине оптимального давления рабочего газа в вакуумной камере.

**Физические основы ионно-лучевых технологических устройств на основе разряда с замкнутым дрейфом электронов.** В технологии нанесения покрытий находят применение автономные ионные источники. Благодаря эффективности и простоте конструкции предпочтение часто отдают разновидности ионных источников на основе РЗДЭ, так называемым ускорителям с замкнутым дрейфом электронов и анодным слоем – УАС. Рассмотрим особенности конструкции и рабочих процессов в УАС.

В основе ускорителей с замкнутым дрейфом электронов лежит предсказанная в [15] возможность создания сильного электрического поля, ортогонального магнитному, в области между плазменными областями, примыкающими к аноду и катоду разрядной ячейки РЗДЭ. Особенности динамики заряженных частиц в РЗДЭ аналогичны таковым в МРС. Физические основы УАС подробно изложены в [16, 17].

В отличие от автономных ионных источников электростатического типа, использующих «сеточный» принцип фиксации ускоряющей разности потенциалов (как, например, в сеточном ионном источнике с электростатическим ускорением ионов типа Кауфмана) [18], в УАС реализуется «безэлектродный» способ ускорения ионов, что является его ключевой особенностью, позволяющей получать ионные пучки с плотностью тока в сотни раз больше, чем при электростатическом ускорении.

Отличие конструкции УАС, представленной на рис. 3, от конструкции магнетронного расплывающего устройства состоит в том, что анод 1 РЗДЭ замыкает межполюсной зазор магнитной системы 2 с минимальным расстоянием между ними, образуя короткий ускоряющий канал 3. Стенками канала являются магнитные полюса 4, которые находятся под катодным потенциалом.



а) – конструктивная схема; б) фото сфокусированного ионного пучка.

Рис. 3 – Ускоритель ионов с анодным слоем.

Магнитное поле в УАС служит для создания двойного электрического слоя, в котором происходит ионизация и ускорение ионов. Величина магнитного поля должна удовлетворять следующему фундаментальному условию: электронный ларморовский радиус (или высота циклоидальной траектории электронного дрейфа) должен быть существенно меньше характерного размера разрядной ячейки, а ларморовский радиус иона должен существенно превышать эту величину. Выполнение этого условия позволяет локализовать процессы ионизации в двойном слое и обеспечивает формирование слабо-расходящегося пучка высокоэнергетичных ионов.

Магнитная индукция в ускорительном канале УАС много больше, чем в магнетроне, и может достигать величины 0,5 Тл. Разрядное напряжение в УАС больше характерных для МРС 500 В и в технологических источниках обычно составляет (1000÷5000) В. В УАС может использоваться практически любой газ, который подается в область разряда со стороны анода или непосредственно через водоохлаждаемый анод.

Электронная компонента в разряде УАС сильно замагничена. В этих условиях в разрядной ячейке формируется так называемый «двойной анод-

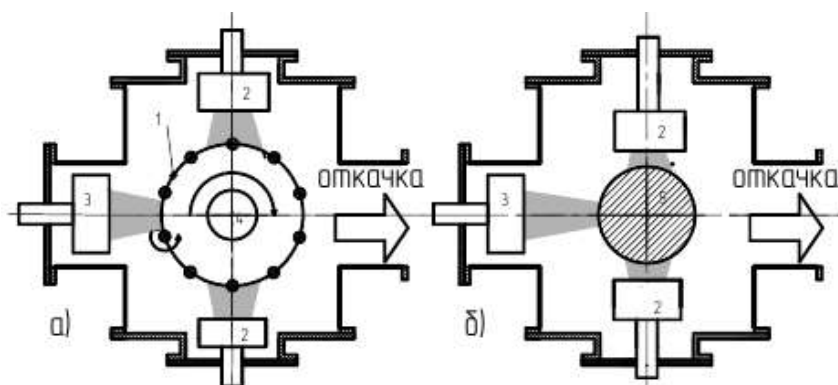
ный слой». В анодном слое температура электронов увеличивается при движении к аноду. Увеличение температуры электронов приводит к резкому повышению электрического потенциала в области анода. Принято считать [15], что в УАС реализуется электростатический механизм ускорения ионов в двойном электрическом слое. Из-за того, что ионизация происходит на некотором удалении от высоковольтной, прианодной границы слоя, энергия ионов на низковольтной границе разряда ниже разрядной разности потенциалов. Как правило, она равна величине порядка половины разрядного напряжения. Очевидно, что чем меньше протяженность области ионизации, тем меньше разброс ионов по энергиям. Малая протяженность области ускорения и незначительная ширина ускорительного канала определяют малую кривизну эмиссионной границы двойного слоя. В результате, в УАС формируется слаборасходящийся пучок с низким разбросом ионов по энергиям. Этот факт иллюстрируется рисунком 3. Важной особенностью рабочего процесса в УАС является высокая вероятность ионизации в слое, что определяет равенство величины ионного тока расходу газа.

В литературе [19] имеются рекомендации по выбору положения анода в непосредственной близости от максимума магнитного поля. Экспериментально было установлено [20], что работа ионного источника улучшается в случае использования полого анода, т. к. при этом увеличивается площадь его контакта с плазмой.

В УАС имеется два характерных режима работы: основной, высоковольтный режим с коллимированным ионным пучком и низковольтный режим с расходящимся пучком. Основной рабочий режим работы существует при малых расходах рабочего газа. В этих режимах величина ионного тока совпадает с разрядным током. В другом режиме разрядный ток превышает расход рабочего газа. Это объясняется тем, что в основном режиме объемный заряд анодного слоя не скомпенсирован ионами, которые быстро уносятся от анода сильным электрическим полем. При повышении разрядного напряжения или расхода рабочего газа в разряде, за счет повышения ионизации, увеличивается холловский ток. В результате скорость генерации ионов происходит быстрее их удаления из области ионизации и ионный ток может достигать значений, на порядок больших, чем в режиме с коллимированным пучком. При этом теряется моноэнергетичность и направленность ионного пучка. Подобный режим работы называют «магнетронным». Примечательно, что при работе УАС в магнетронном режиме сохраняется уровень генерации ионов, приемлемый для проведения ионного ассистирования [21]. При использовании УАС в тандеме с МРС (рис. 4), УАС может играть роль дополнительного источника электронов для разряда в МРС. Как было показано нами в [22], использование в МРС внешнего источника электронов позволяет почти на полпорядка понизить давление рабочего газа. Таким образом, совместное использование УАС и МРС перспективно при организации комбинированного технологического процесса.

**Ионная фокусировка в технологических плазменных устройствах с РЗДЭ.** В настоящее время в ионно-лучевой технологии используются ионные источники различных типов, отличающиеся присущей каждому типу источника характерной формой ионного пучка – цилиндрической, конической, ленточной или трубчатой. В технологических приложениях АИИ может потребоваться использование оптимальной для каждого конкретного случая

формы ионного пучка. В связи с этим возникает задача трансформации одной формы пучка в другую. Чаще всего возникает задача фокусировки ионного пучка на обрабатываемой поверхности.



- а) оснастка для обработки маломерных деталей;  
 б) оснастка для обработки штока;  
 1 – штатная установочная оснастка для обработки маломерных деталей;  
 2 – магнетронный распылитель планарного типа;  
 3 – ускоритель ионов с анодным слоем и сфокусированным пучком;  
 4 – цилиндрический магнетронный распылитель;  
 5 – шток на штатном вращателе установки «Булат»;

Рис. 4 – Универсальная комплектация внутрикамерной оснастки модернизированной установки «Булат» с универсальной оснасткой

В конструкции практически любого ионного источника заложена возможность управления фазовым объемом ионного пучка, обусловленная трансформацией геометрии эмиссионной поверхности. В типичном УАС формируется трубчатый ионный пучок типа кругового или эллиптического тонкостенного цилиндра. Изменением геометрии полюсов магнитной системы, как это показано на рис. 3 и описано в [23], пучок может трансформироваться в коническую или ленточную форму с кроссовером на обрабатываемой поверхности. Подобный способ трансформации формы эффективен в УАС при относительно слабом магнитном поле, не оказывающем заметного влияния на траектории ионов. Выше отмечалось, что в ускорительном канале УАС величина магнитной индукции может достигать значительной величины до 0,5 Тл. В этом случае за пределами области ускорения магнитная индукция еще достаточно велика. За срезом ускорительного канала ионы под влиянием силы Лоренца испытывают «закрутку» на некоторый небольшой угол. При этом траектории ионов в пучке остаются прямолинейными, а трубчатая форма ионного пучка преобразуется в форму однополостного гиперболоида вращения [24]. Это явление затрудняет возможность получения остросфокусированного пучка для повышения плотности ионного тока на подложке. Для компенсации эффекта закрутки ионов используют принципы плазменной оптики. Основы плазменной оптики изложены в [25, 26].

Основным принципом плазменной фокусировки ионов является искривление траекторий объемным зарядом «холодных» электронов. В устройствах с замкнутым дрейфом электронов плотность электронов в плазме, как правило, много больше плотности ионов. Электроны плазмы за счёт своей большой подвижности имеют тенденцию выравнивать потенциал вдоль магнит-



ных силовых линий произвольной конфигурации. В этом состоит свойство "эквипотенциализации" магнитных силовых линий. Если электронная температура вдоль магнитных силовых линий сохраняется, то есть сохраняется т. н. «термализованный потенциал», в системе можно создавать произвольный потенциальный рельеф.

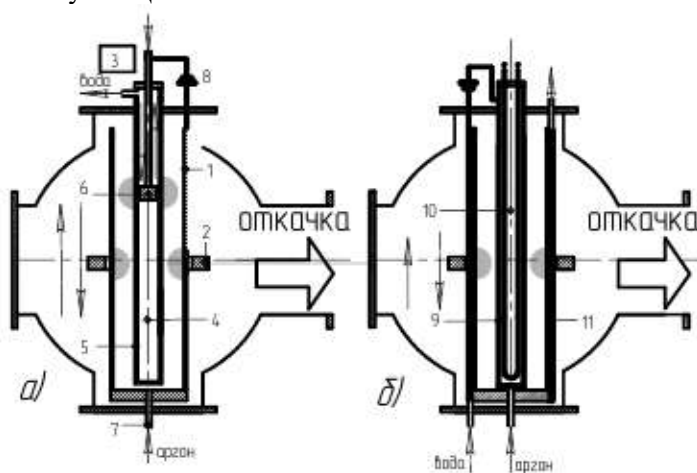
МРС и УАС являются воплощением принципов плазмооптики, т. к. электроны в РЗДЭ замагничены и имеют низкую температуру, а наложенное магнитное поле слабо влияет на динамику ионной компоненты плазмы. Это используется в решении различных технологических задач.

Плазмооптика применяется для осуществления прецизионной фокусировки высокоэнергетичного ионного пучка УАС в области кроссовера. Уширение ионного пучка, вызванное закруткой ионов, возможно скомпенсировать размещением за срезом магнитных полюсов ускорительного канала УАС плазменно-оптической системы, которая обеспечивает противоположное направление закрутки.

**Концепция вакуумно-плазменной технологической установки для комбинированной технологии обработки внутренних и наружных поверхностей.** При проектировании вакуумно-плазменной установки для комплексной ионно-плазменной – ионно-лучевой обработки в качестве базовой использовалась вакуумная камера и система вакуумной откачки установки «Булат 3». Рассматривались два варианта комплектации внутрикамерных плазменных устройств и установочной оснастки. Первый вариант – «специализированный» – предназначался для обработки только двух деталей гидроцилиндра (гильзы цилиндра и штока). Второй вариант комплектации отличался некоторой универсальностью и допускал групповую 3-d обработку малогабаритных деталей с использованием комплексной технологии. Рассмотрим особенности конструкции и характеристики первого и второго вариантов комплектации.

**Специализированная комплектация технологической установки.** Детали гидроцилиндра (гильза цилиндра и шток) обрабатываются в технологической установке поочередно. Используется вертикальный способ установки деталей, как это показано на рис. 5, а). При обработке внутренней поверхности цилиндра, в соответствии с нашим патентом Украины [27], для предварительной подготовки внутренней поверхности цилиндра 1 служит ИнвЦМРС – подвижная инверсная цилиндрическая распылительная система 2 (см. рис. 5, а)). Возвратно-поступательное перемещение магнитной системы ИнвЦМРС вдоль наружной поверхности цилиндра обеспечивается приводом 3, расположенным за пределами вакуумной камеры. Анодом ИнвЦМРС служит цилиндрическая магнетронная распылительная система (ЦМРС) – 4, установленная на оси цилиндра. Материал покрытия – хром, который предварительно осаждается на наружную поверхность трубчатого катода ЦМРС – 5. Магнитная система ЦМРС совершает возвратно-поступательные движения в водоохлаждаемой полости катода с помощью привода, расположенного за пределами вакуумной камеры. Имеется один привод, который поочередно используется для сканирования магнитных систем ИнвЦМРС и ЦМРС. Нижний торец цилиндра заглушен. Через газоподвод 6 в заглушке цилиндра подается рабочий газ. Вакуумная откачка производится через открытый верхний торец цилиндра.

Такая компоновка содержит ряд отличительных признаков, обеспечивающих получение на внутренней поверхности цилиндра покрытия улучшенного качества. Имеются следующие отличительные признаки. 1) Подвижный разряд ИнвЦМРС обеспечивает эффективную предварительную подготовку поверхности цилиндра перед покрытием ионным травлением поверхности и сопутствующим травлению нагревом. Для предотвращения ионного растрыва полированной внутренней поверхности цилиндра, в качестве рабочего газа используется гелий. 2) Выбором величины разрядного промежутка ЦМРС обеспечивается энергетическое ассистирование процесса конденсации покрытия, способствующее получению наноструктуры [28]. 3) Полузамкнутый характер технологической полости (разрядного промежутка) препятствует проникновению нежелательных загрязнений из основного объема вакуумной камеры. 4) Использование трубчатого катода с возобновляемым слоем материала покрытия улучшает экономические показатели технологического процесса. Нами установлено [29], что основным условием обеспечения энергетического ассистирования процесса конденсации является выбор величины разрядного промежутка равным или меньшим высоты магнитной арки разрядного промежутка ЦМРС.



- а) оснастка для обработки внутренней поверхности цилиндра;  
 б) оснастка для обработки наружной поверхности штока;  
 1 – цилиндр; 2 – подвижная магнитная система ИнвЦМРС; 3 – привод.  
 4 – ЦМРС; 5 – катод ЦМРС; 6 – подвижная магнитная система ЦМРС;  
 7 – ввод аргона; 8 – разрядный источник; 9 – шток; 10 – нагреватель;  
 11 – охлаждаемый катод ИнвЦМРС.

Рис. 5 – Конструктивная схема технологической установки со специализированной комплектацией технологической оснастки

Для обработки наружной поверхности штока на место ЦМРС устанавливается шток 9 (см. рис. 5, б)). Учитывая высокое качество предварительной механической обработки поверхности штока и наличие качественной внекамерной ультразвуковой очистки, для внутрикамерной предварительной подготовки можно ограничиться нагревом штока с помощью стационарного резистивного нагревателя – ТЭН-а 10, который устанавливается во внутренней полости штока.

Нанесение хромового покрытия на наружную поверхность штока 9 производилась инверсным цилиндрическим магнетронным распылителем, кото-

рый выполнен по схеме, аналогичной системе подготовки внутренней поверхности цилиндра. Для этого на место цилиндра в вакуумную камеру устанавливается водоохлаждаемый трубчатый катод ИнвЦМРС – 11, охватывающий наружную поверхность штока. На внутреннюю поверхность трубчатого катода наносится возобновляемый слой хрома. Геометрические параметры разрядного промежутка инверсного магнетрона выбираются из условий, аналогичных описанным выше.

**Вариант универсальной комплектации технологической оснастки установки.** В варианте технологической установки для групповой обработки малогабаритных деталей (см. рис. 4, а)) используется штатная установочная оснастка 1 установки «Булат», предназначенная для крепления малогабаритных деталей. Диаметрально противоположные горизонтальные установочные порты вакуумной камеры используются для установки магнетронных распылительных устройств планарного типа 2. На третий горизонтальный порт 3 устанавливается автономный ионный источник УАС 3. Верхний (вертикальный) порт может использоваться для установки дополнительного цилиндрического магнетронного распылителя 4. Штатная установочная оснастка установки «Булат» планетарного типа обеспечивает 3-d обработку малогабаритных деталей. Оппозитная установка планарных несбалансированных магнетронов позволяет организовать эффективную предварительную обработку с ионной бомбардировкой. Автономный ионный источник типа ускорителя с анодным слоем (УАС) может служить как для предварительной ионной обработки, так и для высокоинтенсивной низкоинтенсивной ионной имплантации (ионно-лучевого азотирования). В такой комплектации, кроме групповой обработки, может выполняться комплексная обработка осесимметричных габаритных деталей типа штока силового гидроцилиндра (см. рис. 4, б)).

Рассмотрим особенности конструкции и основные характеристики плазменных технологических устройств: планарной магнетронной распылительной системы несбалансированного типа (ПлНбМРС) и автономного ионного источника газовых ионов с анодным слоем и баллистической фокусировкой ионного пучка (УАСф).

**Планарная магнетронная распылительная система.** Нами разработана, изготовлена и испытана планарная магнетронная система несбалансированного типа [29]. Основным геометрическим параметром ПлМРС – диаметр катода – выбирался из соображений максимального использования распыленного материала. Диаметр обрабатываемого изделия – штока – равен 100 мм. Максимальный перехват распыленного материала (примерно 75 %) возможен при минимальной дистанции напыления 50 мм и диаметре области распыления катода, равном (40÷45) мм. Исходя из этих соображений выбран стандартный дисковый катод ПлМРС диаметром два дюйма (50,8 мм). Толщина катода выбиралась из условий обеспечения необходимого запаса распыляемого материала катода для нанесения слоя покрытия толщиной 20 мкм на поверхность площадью 12,6 дм<sup>2</sup>. Учитывая, что плотность хромового покрытия практически равна теоретической плотности хрома 7,2 г/см<sup>3</sup> [28], и принимая коэффициент использования материала катода равным 0,33, а коэффициент использования распыленного материала равным 0,75, необходимая толщина катода, при учете коэффициента запаса 0,1, принималась равной 10 мм.

Мощность магнетронного разряда при работе на постоянном токе ограничивается следующими двумя факторами: возможностью организации эффективного охлаждения катода; недопустимостью перехода магнетронного разряда в вакуумно-дуговой режим с катодными пятнами. В литературе имеются противоречивые рекомендации относительно предельной плотности разрядного тока. Исходя из нашего опыта [29], при сильном магнитном поле и интенсивном охлаждении катода плотность разрядного тока может достигать значений  $(0,2 \div 0,25)$  А/см<sup>2</sup>. Таким образом, для ПЛМРС50 была установлена предельная мощность 3 кВт при расходе охлаждающей воды 3 л/мин.

В конструкции разработанного нами ПЛМРС50 предусматривались два независимых источника магнитного поля. Для центрального магнитного полюса использовался цилиндрический постоянный магнит NdFeB типа N38 диаметром 20 мм и высотой 16 мм. На внешнем магнитном полюсе устанавливались 6 или 12 магнитов N38 диаметром 14 мм и высотой 10 мм. Изменением количества магнитов на внешнем полюсе регулировалась степень несбалансированности магнитного поля в ПЛНБМРС. В несбалансированном режиме отношение потока газовых ионов на подложку (ток ассистирования) к потоку распыленных частиц (показатель несбалансированности) составляло величину до 0,4.

В таблице 1 приведены характеристики ПЛНБМРС50 в сравнении с аналогичными двухдвоймовыми магнетронами типа ONYX фирмы «Angstromsciences» (США) и фирмы «УВН» (МГТУ им. Баумана, РФ).

Таблица 1 Сравнительные характеристики двухдвоймовых МРС

Тип МРС	Диаметр МРС, мм	Масса МРС, кг	Толщина кат., мм	Ргаон, мПа	Uд, В	Iд, А	Jд, мА/см <sup>2</sup>	N, кВт	L <sub>напыл.</sub> Мм
ONYX	95,3	3,7	до 11,4		10 <sup>3</sup>	3		1,5	до 300
УВН	–	–	–		700	1,5		0,75	до 300
МРС50					700	5	250	3,0	до 300

Повышенные энергетические характеристики ПЛНБМРС50 объясняются усиленной магнитной системой и повышенным расходом охлаждающей воды. Индукция магнитного поля на поверхности катода толщиной 10 мм равнялась 0,06 Тл. Скорость распыления хромового катода изменялась в процессе выработки катода от 0,03 мг/В×А×мин до 0,028 мг/В×А×мин. В таком режиме нанесение хромового покрытия толщиной 20 мкм на рабочую поверхность (12,6 дм<sup>2</sup>) при работе одного магнетрона происходило за 6 часов. Из таблицы видно, что магнетронный распылитель соответствует критериям совершенства, установленным в [30]

Технологический цикл нанесения антифрикционного хромового покрытия включает следующие операции. 1) Высоковакуумная откачка рабочей камеры с включенным резистивным нагревателем мощностью 1 кВт, или с прокачкой через охлаждающую рубашку вакуумной камеры горячей воды. 2) Предварительная подготовка обрабатываемой поверхности ионным травлением и нагревом детали до температуры (380÷400)°С. При обработке магнетронным разрядом использовался рабочий газ гелий. Параметры ионной обработки энергетичными ионами аргона (энергия 3 кэВ, плотность ионного тока 3 мА/см<sup>2</sup>) 3) Нанесение функционального покрытия. В процессе нанесения покрытия температура детали поддерживается на уровне не ниже 300°С. Время нанесения покрытия необходимой толщины предварительно определяется исходя из экспериментально определенной удельной величины эрозии

катода в зависимости от мощности разряда и глубины эрозионной зоны катода. Характер изменения эрозии катода во времени также определяется экспериментально. Для получения покрытия с желаемыми структурно-фазовыми характеристиками величина напряжения смещения на подложке оптимизируется экспериментально. При работе ПЛНБМРС50 на мощности 2 кВт оптимальная величина смещения поддерживалась на уровне (60÷100) В.

**Автономный ионный источник с анодным слоем.** Для обеспечения ионно-лучевой технологии обработки поверхности используется ускоритель газовых ионов с анодным слоем УАС. Нами исследованы рабочие характеристики УАС, конструктивная схема которого представлена на рис. 3. Так как в УАС и МРС используется разряд с замкнутым дрейфом электроном, основной конструкции УАС также является магнитная система, создающая в замкнутом межполюсном зазоре диаметром 110 мм и шириной (5÷6) мм радиальное магнитное поле. Конструкция УАС позволяла изменять величину магнитной индукции в межполюсном зазоре (в максимуме) от 0,15 Тл до 0,5 Тл.

В типичном ускорительном режиме работы УАС, при равенстве ионного тока на подложку разрядному току, величина ионного тока равна 0,1 А при разрядном напряжении порядка 3000 В. Средняя плотность ионного тока на подложку равна 1 мА/см<sup>2</sup> и более. Эта величина была увеличена применением баллистической фокусировки.

Для фокусировки потока энергетичных ионов на обрабатываемой поверхности используется баллистическая фокусировка. Для этого плоскость межполюсного зазора разворачивалась в сторону оси симметрии ускорителя на 20°. В результате баллистической фокусировки кроссовер ионного пучка располагался на расстоянии 150 мм от среза УАС. На подложке образуется кольцеобразная область ионной обработки диаметром (25 – 30) мм. Калориметрированием ионного пучка в сечении кроссовера было определено, что средняя энергия ионов, бомбардирующих подложку, равна 0,5 от приложенного потенциала.

Была рассмотрена возможность получения не кольцевой, а круговой формы кроссовера. Этот результат возможен при снижении магнитной индукции в ускорительном канале УАС. Однако при этом могла ухудшаться ионизация в анодном слое. В качестве другого пути улучшения ионной фокусировки при высокой магнитной индукции в слое рассматривалось использование принципов плазменной оптики. Для этого разрабатывается двухлинзовая конструкция УАС.

Ионно-лучевая обработка традиционно применялась в основном для подготовки поверхности перед нанесением функционального покрытия. Выполненное нами усовершенствование конструкции УАС позволило расширить его функции. Была опробована работа УАС в режиме ионной полировки наружной рабочей поверхности титанового штока. Шероховатость поверхности улучшена от 0,2 мкм до 0,1 мкм. Опробована возможность проведения низкоэнергетической высокоинтенсивной имплантации азота в поверхность образцов из стали 12Х18Н10Т. Получено приращение твердости в четыре раза.

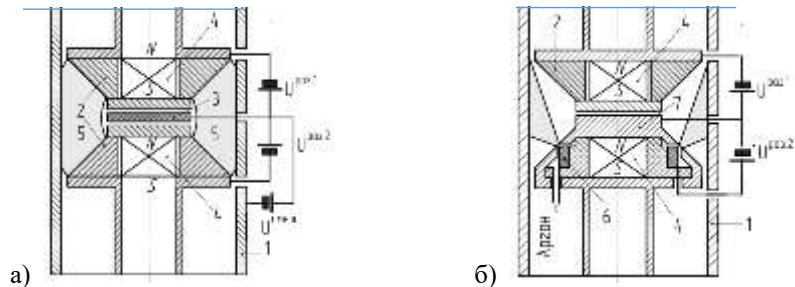
Нами разработана и опробована конструкция УАС, позволяющая проводить ряд переходов ионно-лучевой обработки поверхности детали (или деталей) в одном технологическом цикле. С этой целью УАС устанавливался на

поворотной турели, позволяющей изменять угол падения ионного пучка на обрабатываемую поверхность. Первая операция – ионное травление приводит к снижению параметра шероховатости поверхности (ионная полировка). Для повышения скорости ионного травления сфокусированный пучок ионов аргона ориентировался относительно обрабатываемой поверхности под углом  $50^\circ \div 70^\circ$ . Следующая операция – азотирование – заключается в бомбардировке поверхности ионами азота (или смеси аргон–азот в пропорции 0,3 – 0,7) под углом к поверхности  $90^\circ$ . При азотировании деталь нагревалась резистивным нагревателем до температур  $400^\circ\text{C} \div 500^\circ\text{C}$ . В результате ионно-лучевого азотирования образцов из стали 12Х18Н10Т микротвердость была увеличена от HV 250 до HV 1000. При последующей операции магнетронного нанесения антифрикционного хромового покрытия пучок ионов аргона от УАС ориентировался на катод ПЛН6МРС50. Это позволило снизить рабочее давление аргона в вакуумной камере с  $5 \times 10^{-3}$  Торр до  $8 \times 10^{-4}$  Торр. Учитывая повышенную химическую активность титана (подложки) и хрома (покрытия) при температурах порядка  $400^\circ\text{C} \div 500^\circ\text{C}$ , это позволило улучшить качество покрытия.

**Перспективные конструкции плазменных технологических устройств, для обработки внутренних рабочих поверхностей.** Разработка плазменных технологических устройств была сосредоточена на обеспечении обработки внутренних поверхностей трубчатых изделий малого диаметра. Техническое решение, использующее для подготовки поверхности детали инверсную магнетронную систему [27], применимо только для обработки изделий из неферромагнитного материала. Решалась задача расширения применимости разработанной комбинированной технологии. Было разработано два интегрированных технологических устройства [31, 32], включающих два одинаковых или различных устройства для обработки трубчатых изделий из ферромагнитного металла. В первом, показанном на рисунке 6, а), использовались два оппозитно расположенных магнетрона с катодами конической формы. Была реализована дуальная схема, охарактеризованная в [33], которая позволяет извлекать из магнетронного разряда на подложку ионный ток. Противоположно ориентированные магнитные полюса магнетронов создают в пространстве между катодами область обобщенного магнитного поля. Плазма двух магнетронных разрядов локализуется между катодами и подложкой, что облегчает организацию режима ионного ассистирования. В устройстве этого типа имеется возможность нанесения биметаллических покрытий и ламинатных покрытий с чередующимися слоями.

Магнетрон с коническим катодом был разработан в связи с необходимостью производить нанесение покрытия на внутреннюю поверхность непроходного типа (с глухим доньшком). Особенностью КМРС является повышенный (больше 0,5) коэффициент использования материала катода. Это можно объяснить особенностью формы катода.

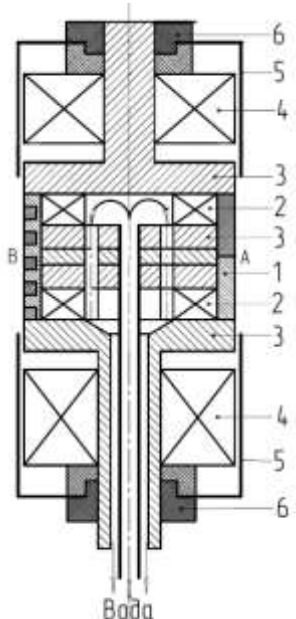
В другой конструкции интегрированного плазменного устройства, показанной на рисунке 6, б), аналогичная задача решалась использованием оппозитно установленных КМРС и УАС с расходящимся ионным пучком. Поочередным или одновременным включением КМРС и УАС может производиться весь комплекс технологических переходов комбинированной технологии обработки.



а) opposитно расположенные КМРС; б) opposитно расположенные КМРС и УАС; 1 – обрабатываемая трубчатая деталь; 2 – катод-мишень КМРС; 3 – анод магнетронного разряда; 4 – магнитная система; 5 – область магнетронного разряда; 6 – анод УАС; 7 – анод КМРС – катод УАС.

Рис. 6 – Конструктивные схемы цилиндрических распылительных систем.

Особенностью УАС является возможность работы как в режиме генератора плазмы, так и в режиме генератора ускоренных ионов, что расширяет технологические возможности интегрированного плазменного технологического устройства. Описанные интегрированные устройства имеют ограничения по применению только для изделий проходного типа и отличаются некоторой конструктивной сложностью и неудобствами эксплуатации.



1 – катод-мишень; 2 – постоянные магниты; 3 – магнитные полюса; 4 – магнитные катушки; 5 – анод-защитный экран; 6 – изолятор.

Рис. 7 – Конструктивная схема несбалансированной цилиндрической магнетронной распылительной системы.

Изменением соотношения токов в магнитных катушках возможно получить смещение максимума распределения тока ассистирования на подложке, которое как бы расширяет область ионного воздействия на конденсат. В составе этого распылителя были испытаны составные катоды для получения биметаллических покрытий типа (Ti–Al)N. Варианты составных катодов А и В показаны на рисунке 7. Эта конструкция НБЦМРС имеет преимущества перед предыдущими при обработке длинномерных ферромагнитных труб.

1. Гришкевич А. Д. Разработка комбинированной технологии упрочнения деталей. Техническая механика. 2017. № 3. С. 100–114.
2. Баранов О. О., Саночкин Ю. В. Теория разряда с замкнутым дрейфом электронов. Журнал технической физики, 1974. N12. С. 2501–2516.
3. Морозов А. И. Введение в плазмодинамику. М.: Физматлит, 2006. 576 с.
4. Пleshивцев Н. В. Катодное распыление. М.: Атомиздат, 1968. 340 с.
5. Берши П. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. М.: Мир. 1984. 336 с.
6. Габович М. Д. Физика и техника плазменных источников ионов. М.: Атомиздат, 1972. 304 с.
7. Данилин Б. С. Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982. 72 с.
8. Кузьмичев А. И. Магнетронные распылительные системы. Киев: Аверс, 2008. 244 с.
9. Kouznetsov V., Masak R., Schneider J. M., Yilmersson U., Petrov I. A novel pulsed magnetron sputter technique utilizing very high target paver densities. Surface and Coating Technology. 1999. № 2 – 3. P. 290–293.
10. Мозгрин Д. В. Экспериментальное исследование сильноточных форм квазистационарного разряда низкого давления в магнитном поле. Физика плазмы. 1995. № 5. С. 422–433.
11. Levchuk D. Plasma assisted techniques for deposition of super hard nanocomposite coatings. Surface and Coating Technology. 2007. № 2007. P. 6071–6077.
12. Musil J., Šuna J. The role of energy in formation of sputtered nanocomposite films. Mater. Scien. Forum. – 2005. V. 502. P. 291–296.
13. Window B., Savvides N. Unbalanced magnetrons as sources of high ion fluxes. J. Vac. Sci. Technol A. 1986. № 3. P. 453–465.
14. Гришкевич А. Д., Гринюк С. И. Исследование характеристик несбалансированности планарной магнетронной распылительной системы. Проблемы высокотемпературной техники. 2012. С. 45–52.
15. Жаринов А. В., Попов Ю. С. Об ускорении плазмы замкнутым Холловским током. Журнал технической физики. 1957. № 2. С. 63–70.
16. Гаркуша В. И., Лесков Л. В., Ляпин Е. А. Плазменные ускорители с анодным слоем. М.: Наука. 1984. С. 129–138.
17. Виноградов М. И., Машиев Ю. П. Вакуумные процессы и оборудование ионно- и электроннолучевой технологии. М.: Машиностроение, 1989. 53 с.
18. Zhurin V. V. Industrial Ion Sources: Broadbeam Gridless Ion Source Technology. Published 2012 by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. P. 311.
19. Ионные источники с замкнутым дрейфом электронов. URL: [http:// www.pronica.ru.htm/](http://www.pronica.ru.htm/)
20. Духопельников Д. В., Юрченко А. А. Экспериментальное исследование технологического ускорителя с анодным слоем. Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2004. № 3. С. 74–83.
21. Гончаров А. А., Добровольский А. Н., Павлов С. Н. Плазменный ускоритель с анодным слоем для обработки поверхности материалов. Проблемы атомной науки и технологии. Серия физика. 2000. № 6. С. 160–163.
22. Гришкевич А. Д., Хитько А. В. Использование плазменного источника электронов в магнетронной системе ионного распыления. Проблемы высокотемпературной техники. 2011. С. 42–45.
23. Bizukov A. A., Girka A. I., Sereda K. N. at all Hall ion source with ballistic and magnetic beam focusing. Hnjdllems of atomic science and technology. 2008. № 6. P. 174–176.
24. Марахтанов М. К., Духопельников Д. В., Ивахненко Д. В. Электронный научно-технический журнал МГТУ им. Н. Э. Баумана. С. 219 – 232. URL: <http://www.technomag.doc/edu/ru/doc/483944.html>.
25. Морозов А. И. Фокусировка холодных квазинейтральных пучков в электромагнитных полях. ДАН СССР. 1965. № 6. С. 1363–1373.
26. Габович М. Д., Пleshивцев Н. В., Семашко Н. Н. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. М.: Энергоатомиздат, 1986. 248 с.
27. Патент на корисну модель Україна № 38845U, МПК<sup>6</sup> C23C14/00. Плазмовий пристрій. Заявл. 01.07.2008. Опубл. 26.01.2009, Бюл. № 1, 4 с.
28. Берлин Е. В., Сейдман Л. А. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии. М.: Техносфера, 2011. 528 с.
29. Гришкевич А. Д., Гринюк С. И., Коваленко В. В., Кучугурный Ю. П., Технологические плазменные устройства на основе разряда с замкнутым дрейфом электронов. Разработка и применение. Техническая механика. 2013. № 4. С. 43–57.
30. Рогов А. В., Капустин Ю. В., Мартыненко Ю. В. Факторы, определяющие эффективность магнетронного распыления. Журнал технической физики. 2015. № 85, С. 126–134.
31. Патент на корисну модель Україна № 93471: МПК<sup>6</sup> C23C 14/00. Ионно-плазмова установка. Заявл. 11.05.2010. Опубл. 10.02.2011, 3 с.
32. Патент на корисну модель Україна № 89038. МПК<sup>6</sup> C23C 14/00. Ионно-плазмовий пристрій інтегрованого типу для обробки внутрішніх поверхонь. Заявл. 28.10.2013. Опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7, 4 с.
33. Сватковский И. В. Направления развития магнетронных распылительных систем. Минск: Доклады БГУИР. 2007. № 2(18). С. 112–121.
34. Патент на корисну модель Україна №102744, МПК<sup>6</sup> C23C14/00. Несбалансована циліндрична магнетронна розпилююча система. Заявл. 28.10.2013. Опубл. 25.11.2015, Бюл. № 22, 5 с.

Получено 16.10.2017,  
в окончательном варианте 11.12.2017