

## ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ МАГНЕТРОННАЯ РАСПЫЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА С ИОННЫМ АССИСТИРОВАНИЕМ

Для нанесения наноструктурированных покрытий на внутренние поверхности разработана оригинальная конструкция несбалансированной цилиндрической магнетронной распылительной системы. Разработанная конструкция характеризуется простотой и возможностью выполнения всех технологических переходов ионно-плазменной обработки в одном вакуумном цикле. Расчетными и экспериментальными методами исследована структура магнитного поля в распылительной системе. Определены рабочие режимы предварительной ионной обработки и наноструктурирования покрытия способом ионного асистирования. Результаты работы могут быть использованы при проектировании технологии и технологических устройств нанесения функциональных покрытий на внутренние поверхности пар трения типа цилиндр – поршень, работающих в условиях повышенного коррозионного и абразивного износа.

Для нанесення наноструктурованих покриттів на внутрішні поверхні розроблено оригінальну конструкцію незбалансованої циліндричної магнетронної розпилюючої системи. Розроблена конструкція характеризується простотою і можливістю виконання всіх технологічних переходів іонно-плазмової обробки в одному вакуумному циклі. Розрахунковими і експериментальними методами досліджено структуру магнітного поля в розпилюючій системі. Визначено робочі режими попередньої іонної обробки і наноструктурування покриття іонним асистуванням. Результати роботи можуть бути використані при розробці технології і технологічних пристроїв для нанесення функціональних покриттів на внутрішні поверхні пар тертя типу циліндр – поршень, що експлуатуються в умовах підвищеного корозійного і абразивного зносу.

Original design of a non-balanced cylindrical magnetron sprayed system is developed for nanostructured coating the inner surfaces. This design is characterized by simplicity and the possibility of executing all technological transitions of ion-plasma processing in one vacuum cycle. The structure of a magnetic field in the sprayed system is determined by the calculating and experimental methods. Working regimes of preliminary ion processing and nanostructured coating by ion assisting are defined. The research results can be used in the design of a technology and technological devices for functional coating the inner surfaces of friction pairs of the cylinder – piston type operating under conditions of corrosion and abrasive wear.

Последние два десятилетия интенсивно развиваются ионно-плазменные технологии нанесения наноструктурированных покрытий, обладающих функциональными и эксплуатационными свойствами, недостижимыми для покрытий предыдущего поколения. Существенное улучшение физико-механических характеристик покрытий было достигнуто в результате открытия фундаментальной зависимости свойств твердого тела от его структуры. Структурное состояние оказывает определяющее влияние как на объемные, так и на поверхностные свойства материалов. Измельчение структурных элементов материалов (наноструктурирование) существенно повышает твердость и, как следствие, улучшает функциональные и эксплуатационные характеристики рабочих поверхностей [1].

В работе [2] была предложена теоретическая концепция создания нанокристаллических покрытий, согласно которой такие покрытия должны состоять из свободных от дислокаций нанокристаллитов размером 3 – 10 нм, разделенных прослойкой аморфной фазы размером 1 – 3 нм. Было показано, что параметрами, влияющими на увеличение твердости нанопокровтий, являются наноструктура покрытия и макронапряжения, возникающее в покрытии в процессе конденсации.

В работе [3] обосновывается, что одним из наиболее продуктивных путей изменения микроструктуры покрытий является проведение процесса осаждения в условиях внешнего энергетического воздействия, осуществляемого бомбардировкой поверхности осаждения энергетическими частицами (быстрыми нейтралами и низкоэнергетичными ионами). Ионная бомбардировка (ионное асистирование) в процессе формирования покрытия приводит к

уменьшению размеров кристаллитов, уплотнению границ зерен и появлению сжимающих напряжений. Таким образом, ионное ассистирование позволяет уменьшить размер зерна и тем самым изменяет структуру и физико-механические свойства покрытий.

Величину энергетического воздействия, при условии постоянства температуры подложки, можно выразить следующей зависимостью:

$$E_{ib} = E_i \frac{v_i}{v_a} = e(U_p - U_s) \frac{v_i}{v_a} = eU_s \frac{i_s}{a_d}$$

Где:  $E_{ib}$  – энергия осаждения;  $E_i$  – энергия ионов ассистирования;  $v_i$  – поток ионов ассистирования;  $v_a$  – поток осаждаемых атомов;  $U_p$  – потенциал плазмы;  $U_s$  – потенциал смещения;  $i_s$  – плотность тока ионов ассистирования;  $a_d$  – скорость конденсации атомов на подложке.

Эффект управления структурой может быть достигнут при значениях плотности тока ассистирования  $i_s \geq 1$  мА/см<sup>2</sup> и при энергии ионов в диапазоне от плавающего потенциала до 200 эВ.

Наиболее перспективной для получения нанопокровтий является магнетронная технология. Магнетронные распылительные системы (МРС) позволяют создавать потоки атомных частиц, свободные от макрочастиц материала покрытия, что упрощает получение совершенной наноструктуры.

При использовании МРС традиционной схемы ионное ассистирование невозможно из-за того, что за пределами магнетронного разряда плазма практически отсутствует. Благодаря разработанной в [4] концепции МРС с несбалансированной магнитной системой, существенно упростилась возможность использования ионного ассистирования при магнетронном нанесении покрытий. Несбалансированность магнитного поля в МРС создается усилением магнитного потока через наружный магнитный полюс магнитной системы. В результате этого нарушается совершенство магнитной ловушки и для электронов разряда появляется возможность выхода в сторону подложки. Благодаря амбиполярной диффузии, электроны увлекают за собой ионы и пролетное пространство между распыляемым катодом МРС и поверхностью конденсации заполняется плазмой. При подаче на подложку отрицательного потенциала смещения из плазмы на подложку вытягиваются ионы ассистирования. Плотность тока ионов ассистирования определяется показателем несбалансированности магнитной системы, а энергия ионов ассистирования задается величиной потенциала смещения на подложке

В настоящее время, для получения наноструктурированных покрытий, разработаны и применяются в промышленности эффективные магнетронные распылительные системы несбалансированного типа. При этом обращает на себя внимание тот факт, что подавляющее большинство разработанных технологических устройств для нанесения нанопокровтий предназначено для обработки наружных рабочих поверхностей. При этом существует обширный класс деталей с внутренними рабочими поверхностями, нуждающимися в повышении функциональных и эксплуатационных свойств путем нанесения покрытий. К таким деталям можно отнести пары трения, работающие в условиях повышенного коррозионного и абразивного износа, например силовые гидроцилиндры горных машин. Одной из рабочих поверхностей пары трения гидроцилиндра является внутренняя поверхность гильзы. Традиционной тех-

нологией упрочнения этой детали является гальваническое хромирование – технология неблагоприятная как по экологическим характеристикам, так и по ограниченности возможности дальнейшего повышения эксплуатационных свойств поверхности. Применение ионно-плазменной технологии модификации внутренних поверхностей способно существенно улучшить сопротивляемость износу, но ограничивается отсутствием современного технологического оборудования для нанесения наноструктурированных покрытий на внутренние поверхности.

Вакуумные установки для ионно-плазменной обработки поверхности, как правило, включают отдельные плазменные устройства для осуществления следующих основных технологических функций:

- предварительной ионной подготовки поверхности высокоэнергетичными ионами перед нанесением покрытия;
- генерации потока частиц материала покрытия;
- генерации низкоэнергетичных ионов для ассистиования процесса конденсации покрытия.

Нами разработан ряд магнетронных распылительных систем интегрированного типа, обеспечивающих все технологические переходы ионно-плазменной обработки [5, 6, 7], и отработана технология их применения для нанесения покрытий на внутренние рабочие поверхности гидроцилиндров [8, 9]. Однако конструктивная сложность плазменных технологических устройств интегрированного типа ограничивает их промышленное использование обработкой деталей уникальной или мелкосерийной техники.

В настоящей работе решалась задача создания универсального магнетронного устройства цилиндрического типа (ЦМРС), обеспечивающего выполнение всех основных технологических переходов ионно-плазменной обработки внутренней поверхности в одном вакуумном цикле.

Поставленная задача решалась с использованием концепции магнитной несбалансированности. Несбалансированность магнитного поля планарной МРС может создаваться путем использования дополнительного источника магнитного поля в виде катушки с током [10] или усилением внешнего магнита коаксиальной магнитной системы [11]. Для ЦМРС первый путь неприемлем из-за увеличения габаритов системы, второй из-за отличия конструкции магнитных систем планарной МРС и принятой нами конструкции цилиндрической МРС с продольным сканированием однотрекового радиального магнетронного разряда. Несбалансированность магнитного поля в однотрековой радиальной магнитной системе ЦМРС создать не удалось. Применением двухтрековой конструкции магнитной системы с антипараллельным дрейфом в разрядных треках удалось достичь несбалансированности магнитного поля в ЦМРС.

Отличительным признаком блока магнитной системы разработанной конструкции ЦМРС несбалансированного типа (НБЦМРС) является то, что он состоит из трех соосных дисковых магнитных полюсов, расположенных в полости трубчатого катода причем крайние магнитные полюса имеют одинаковую полярность которая противоположна полярности центрального магнитного полюса. Между полюсами расположены основные источники магнитного поля – постоянные магниты. К внешним торцам крайних магнитных полюсов примыкают дополнительные источники магнитного поля, выполненные в виде катушек с током на ферромагнитных сердечниках. Конструк-

ция НБЦМРС показана на рис. 1. НБЦМРС и обрабатываемое изделие 2 монтируются на оси вакуумной камеры 1. Вакуумная камера выполняет роль анода магнетронного разряда. Относительно вакуумной камеры катод НБЦМРС 5 и обрабатываемое изделие находятся под отрицательными потенциалами. На рис. 1 показаны: разрядный источник 3; источник смещения подложки 4; магнитные полюса 6; основные магнитные источники 7; магнитные катушки 8 на ферромагнитных сердечниках 9.

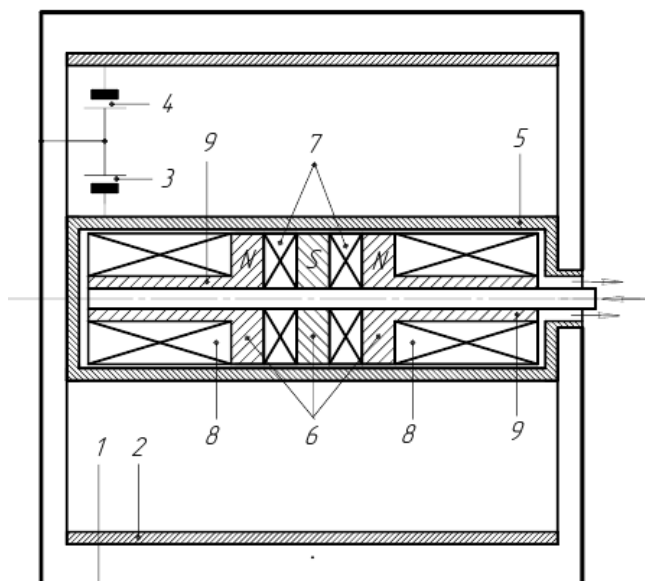


Рис. 1

Несбалансированность магнитной системы была исследована моделированием магнитного поля с помощью компьютерной программы FEMM 4,2. На рис. 2а показана картина магнитного поля при параллельном включении магнитных катушек. Характерная картина магнитного поля свидетельствует о несбалансированности магнитного поля. Показатель несбалансированности НБЦМРС оценивался по координате характерной точки  $Z_0$ . Методика оценки показателя несбалансированности аналогична использованной нами в работе [9]. В характерной точке  $Z_0$  происходит поворот дрейфа электронов в сторону подложки и их выход из магнитной ловушки. Положение точки поворота дрейфа исследовалось в зависимости от тока через магнитные катушки. Показатель несбалансированности изменялся от нулевого значения (сбалансированная магнитная система) при обесточенных катушках до показателя 2,5, при котором величина потока осаждаемых атомов на подложку в четыре раза превышает поток ионов ассистирования.

Недостатком несбалансированных МРС является неоднородность распределения плотности тока ионов ассистирования в поперечном сечении потока. Эта неоднородность сглаживается на некотором удалении от распыляемого катода, но на расстояниях от катода, близких к положению точки  $Z_0$ , ширина области ионного ассистирования оказывается существенно уже ширины области осаждения покрытия на подложке. Такая ситуация имеет место при обработке внутренних поверхностей.

При раздельном питании магнитных катушек, изменяя соотношение тока в катушках, возможно создавать асимметрию магнитного поля и тем самым

управлять положением точки  $Z_0$  в поперечном сечении потока. При изменении положения точки  $Z_0$  поток ионов ассистирования сканирует область конденсации покрытия в поперечном направлении. Это свойство разработанной конструкции НБЦМРС является отличительным признаком по сравнению с

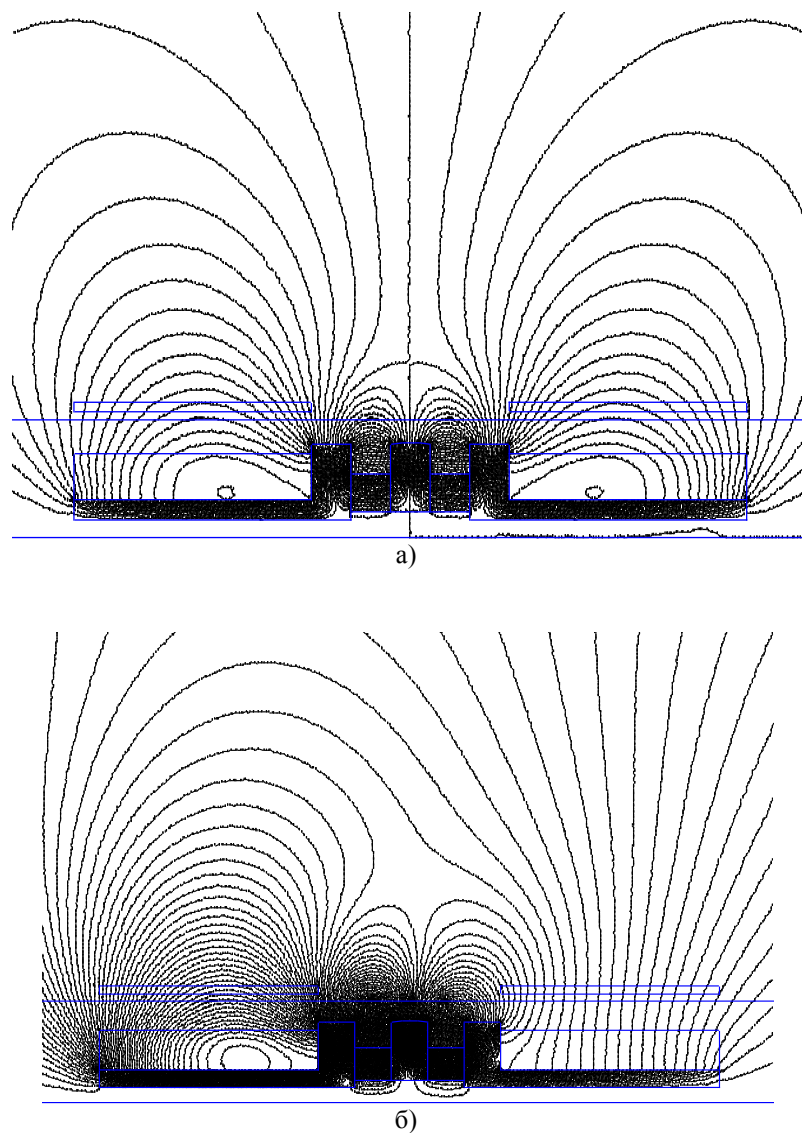


Рис. 2

несбалансированной планарной МРС. Картина асимметричного магнитного поля показана на рис. 2б.

Распределение плотности тока ионов ассистирования в поперечном сечении потока исследовалось зондовым методом. Измерения проводились при максимальном значении несбалансированности. На рис. 3 видно, что расходимость потока ионов слабо зависит от удаления от катода. На удалении 120 мм от катода плотность ионного тока в максимуме достигает значения, предельного для проведения эффективного воздействия на структуру покрытия. В эксперименте отмечалось, что измеряемое значение тока ассистирования сильно зависит от давления в вакуумной камере. При повышении давле-

ния от 2,5 мТорр до 5 мТорр ток падал на 25%. Снижение тока, по-видимому, можно объяснить резонансной перезарядкой газовых ионов. При этом энергетическое воздействие на осаждаемое покрытие могут обеспечивать быстрые нейтралы.

Несбалансированная ЦМРС обладает еще одним полезным свойством. При минимальном значении тока разряда МРС, при котором поток распыленных атомов минимален, значение напряжения смещения увеличивают таким образом, чтобы энергия ионов ассистирования превосходила значение, необходимое для ионного травления слоя конденсирующихся на подложке атомов. Этот режим может быть использован для предварительной подготовки поверхности конденсации (ионного травления и нагрева) высокоэнергетичными ионами.

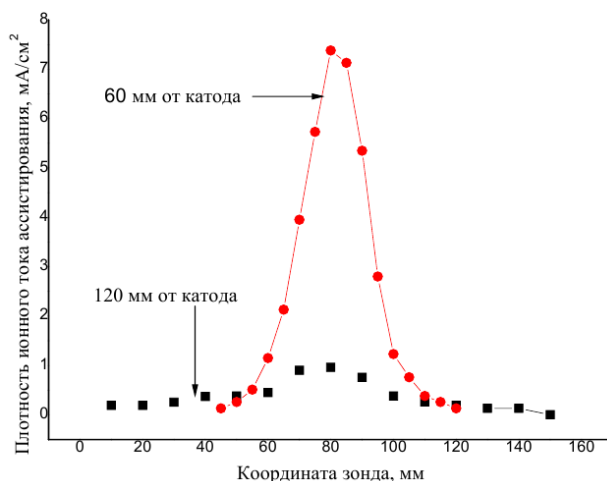


Рис. 3

Таким образом, разработана конструкция магнетронной распылительной системы несбалансированного типа, обладающая возможностями выполнения всех технологических переходов ионно-плазменной обработки внутренней поверхности в одном вакуумном цикле. Исследована структура магнитного поля в области разряда. Показана эффективность разработанного способа управления потоком ассистирующих ионов. Получены данные о рабочих режимах НБЦМРС при осаждении покрытия с ионным ассистированием в широком диапазоне значений параметра несбалансированности.

1. *Peter M. Martin Handbook of Deposition Technologies for films and coatings / M. Martin Peter // Elsevier. – 2010. – P. 912.*
2. *Veprek S. et al. Different approaches to superhard coatings and nanocomposites / Veprek S., Maritz G. J. et. al. // Thin Solid Films. – 2005. – Vol. 476. – P. 1 – 29.*
3. *Musil J. The role of energy in formation of sputtered nanocomposite films / Musil J., Šuna J. // Mater. Scien. Forum. – 2005. – Vol. 502. – P. 291 – 296.*
4. *Window B. Unbalanced magnetrons as sources of high ion fluxes / Window B, Savvides N. J. // Vac. Sci. Technol. A. – 1986. – Vol. 4, № 3. – P. 453 – 507.*
5. Патент на изобретение №38845U, Украина, МПК С23С 14/00. Плазменное устройство / Гришкевич А.Д.; заявитель и патентообладатель Институт технической механики НАНУ и НКАУ. – u200808700; заявл. 01.07.2008; опубл. 26.01.2009, Бюл. №2. – 4с.
6. Патент на изобретение №93471, Украина, МПК С23С 14/35, 14/56. Ионно-плазменная установка / Гришкевич А.Д., Гринюк С.И.; заявитель и патентообладатель Институт технической механики НАНУ и НКАУ. – a201005669\$; заявл. 11.05.2010; опубл. 10.02.2010, Бюл. №23. – 4с.

7. Патент на изобретение №93833U, Украина, МПК С23С 14/00. Ионно-плазменное устройство «гибридного» типа / *Гришкевич А. Д.* ; заявитель и патентообладатель Институт технической механики НАНУ и НКАУ. – а201005613 ; заявл.11.05.2010 ; опубл. 10.03.2011, Бюл. №5. – 4с.
8. *Гришкевич А. Д.* Нанесение функционального покрытия на внутреннюю стенку осесимметричного изделия малого диаметра / *А. Д. Гришкевич* // Проблемы высокотемпературной техники. – 2011/. – С. 37 – 41.
9. *Гришкевич А. Д.* Исследование характеристик несбалансированности планарной магнетронной распылительной системы / *А. Д. Гришкевич, С. И. Гринюк* // Проблемы высокотемпературной техники. – 2012. – С. 45 – 52.
10. *Свадковский И. В.* Направление развития магнетронных распылительных систем / *И. В. Свадковский* // Доклады БГУИР (Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники). – 2007. – №2(18). – С.112 – 121.

Институт технической механики  
НАН Украины и ГКА Украины,  
Днепропетовск

Получено 12.06.13,  
в окончательном варианте 17.06.13