

9. Grigorenko, Ya.M., Bespalova, E.I., Kitaigorodskiy, A.B. and Shinkar, A.I. (1986), "Svobodnyie kolebaniya elementov obolocheknyih konstruktsiy", Nauk. dumka, Kiev.
10. Kamke, E. (1971), "Spravochnik po obyknovennym differentsialnyim uravneniyam", Nauka, Moscow.
11. Redekop, D. (2004), "Vibration analysis of a torus – cylinder shell assemble", *J. of Sound and Vibration*, vol. 277, pp. 919-930.
12. Chung, H. (1981), "Free vibration analysis of circular cylindrical shells", *J. of Sound and Vibration*, vol. 74, pp. 331-350.
13. Ganesan, N. and Sivadas, K.R. (1990), "Free vibration of cantilever circular cylindrical shells with variable thickness", *Computers and Structures*, vol. 34, P. 669-677.

УДК 533.9 ; 621.793

## **НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ВНУТРЕННИХ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПАР ТРЕНИЯ**

Гришкевич А. Д., к. т. н., Гринюк С. И.

*Институт технической механики Национальной академии наук Украины  
и Государственного космического агентства Украины,  
ул. Лешко-Попеля, 15, г. Днепрпетровск, Украина*

Gryshkevych.O.D@nas.gov.ua

В статье представлены результаты разработки новых магнетронных технологических устройств для ионно-плазменного упрочнения внутренних рабочих поверхностей пар трения. Разработаны технологические магнетронные устройства интегрированного типа для обработки деталей с внутренним диаметром более 80 мм и магнетронное устройство для обработки неферромагнитных деталей диаметром более 20 мм. Разработано несбалансированное цилиндрическое магнетронное распылительное устройство для нанесения наноструктурированных покрытий на внутренние и наружные рабочие поверхности. Обсуждаются особенности применения разработанных плазменных технологических устройств.

*Ключевые слова: внутренняя рабочая поверхность, наноструктурированное покрытие, системы распыливание цилиндрического магнетрона, нестойкое магнетронное напыление, очищение с помощью иона, механические свойства покрытий.*

## **ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ЗМІЦНЮЮЧОЇ ІОННО-ПЛАЗМОВОЇ ОБРОБКИ ВНУТРІШНІХ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ПАР ТЕРТЯ**

Гришкевич О. Д., к. т. н., Гринюк С. І.

*Інститут технічної механіки Національної академії наук України  
і Державного космічного агентства України,  
вул. Лешко-Попеля, 15, м. Дніпропетровськ, Україна*

Gryshkevych.O.D@nas.gov.ua

У статті наведено результати розробки нових магнетронних технологічних пристроїв для іонно-плазмового зміцнення внутрішніх робочих поверхонь пар тертя. Розроблено магнетронні технологічні пристрої інтегрованого типу для обробки деталей з внутрішнім діаметром більше 80 мм і магнетронний пристрій для обробки неферромагнітних деталей діаметром більше 20 мм. Розроблено незбалансований циліндричний магнетронний пристрій для нанесення наноструктурованих покриттів на внутрішні і зовнішні робочі поверхні. Обговорюються особливості використанні розроблених плазмових технологічних пристроїв.

*Ключові слова: внутрішня робоча поверхня, наноструктуровані покриття, системи розпилювання циліндричного магнетрону, нестійке магнетронне напылення, очищення за допомогою іону, механічні властивості покриттів.*

## SOME SPECIAL FEATURES OF STRENGTHENING ION-PLASMA TREATMENT OF INNER WORKING SURFACES OF FRICTION PAIRS

Gryshkevych O. D., Ph.D. of Technical Science, Grinyuk S. I.

*Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine  
and State Space Agency of Ukraine,  
Leshko-Popela str., 15, Dnepropetrovsk, Ukraine*

Gryshkevych.O.D@nas.gov.ua

The paper deals with some special features of the application of a nanostructured coating to inner working surfaces of friction pairs. A magnetron ion-assisting technology is intended to be optimal for the ion-plasma treatment of inner working surfaces when the length to inner diameter ratio is greater 3 – 5. Special features of treatment of inner surfaces with diameters of 20-100 mm are due to a limited volume of the treated cavity. In this case difficulties emerge to create technological plasma devices with an added system of electrodes for a preliminary ion preparation of the surface and ion assisting.

Versions of using autonomous sources of ions and unbalanced magnetron sputtering systems. It is shown that for treatment of surfaces with diameters of more 80 mm it is possible to use integrated technological plasma devices with the balanced magnetron sputtering system integrated with the ion source of the magnetron or vacuum-arc type.

An unbalanced cylindrical magnetron device is developed to simplify the design of the technological plasma device. The device developed allows all technological operations of the application of a nanostructured coating to inner surfaces of ferromagnet and nonferromagnet parts with diameters of more 100 mm.

The technological plasma device for the application of coatings to surfaces with diameters of 20-100 mm and the technology using the unbalanced cylindrical magnetron with the extended pipe cathode and the scanning inverse magnetron for a preliminary ion preparation of the surface are developed. Such design of the technological plasma device allows only treatment of parts made from a non-ferromagnetic material.

Difficulties due to a significant difference between the time of ion activation of the treated surface and the time for heating a massive part emerge when treating massive parts.

In this case the effect of ionic etching a precision surface of friction pairs treated up to the roughness parameter  $R_a = 0.1$  may occur. The ionic treatment of the surface by helium ions has been used with the object of surmounting a discrepancy.

The paper gives consideration to special features of the technological process of the application of a nanostructured coating to inner surfaces of small diameters.

It is shown that conditions of energetic interactions between the condensate and the discharged plasma volume are realized for the application of a coating at the limited distance between the sputtered surface (the magnetron cathode) and the condensation surface (the magnetron anode), resulting in the same effect as ion assisting and providing nanostructurization of a coating.

The phenomenon of an energetic interaction between the condensate and the magnetron discharge plasma in the process of a direct interaction calls for further investigation in order to use it in practice of the application of functional nanostructured coatings.

*Key words: inner working surface, nanostructured coating, cylindrical magnetron sputtering system, unbalanced magnetron sputtering system, ion assisting, mechanical properties of coatings.*

Принято считать, что основной причиной потери работоспособности машин и механизмов является механический износ деталей и элементов конструкции в результате трения и усталости конструкционного материала. В обоих случаях основным фактором, определяющим ресурс деталей, являются механические свойства рабочих поверхностей. Одним из наиболее эффективных способов улучшения ресурсных характеристик деталей машин является упрочнение рабочих поверхностей путем нанесения функциональных наноструктурированных покрытий. Современный прогресс в области технологии нанесения нанопокровтий обусловлен развитием представлений о том, что функциональные свойства рабочих поверхностей определяются не только элементным составом конструкционного материала, но и в значительной степени зависят от структурного состояния поверхностного слоя [1-3]. Исследования зависимости механических свойств поверхностного слоя от его структурного состояния привели к созданию новых упрочняющих покрытий, обладающих функциональными свойствами, недостижимыми для покрытий предыдущего поколения. Были разработаны новые технологии нанесения покрытий и технологические плазменные устройства нового типа. Существенный прогресс в этой области связан с разработкой магнетронных распылительных систем несбалансированного типа (НБМРС) [4], которые существенно упростили получение наноструктурированных покрытий с необходимыми функциональными характеристиками.

В работе [2] показано, что измельчение структурных элементов материалов (наноструктурирование) и микронапряжения, возникающее в покрытии в процессе конденсации, определяющим образом влияют на увеличение твердости покрытий и, как следствие, улучшают функциональные и эксплуатационные характеристики рабочих поверхностей. В работе [3] обосновывается, что наиболее продуктивным способом изменения микроструктуры поверхностного слоя является проведение процесса осаждения покрытия в условиях внешнего энергетического воздействия. Энергетическое воздействие может осуществляться бомбардировкой поверхности осаждения энергетическими частицами (быстрыми нейтралами, низкоэнергетичными ионами). Ионная бомбардировка (ионное ассистирование) в процессе формирования покрытия приводит к уменьшению размеров кристаллитов, уплотнению границ зерен и появлению сжимающих микронапряжений в покрытии. Наиболее эффективно наноструктурирование реализуется при ионно-плазменной технологии нанесения покрытий, базирующейся на использовании плазменных технологических устройств магнетронного и вакуумно-дугового типов.

В настоящее время в мировой практике машиностроительного производства наиболее распространенной является магнетронная технология нанесения высокопрочных наноструктурированных покрытий на металлообрабатывающий инструмент. Заметим, что входящие в состав вакуумных технологических установок технологические плазменные устройства предназначены для выполнения двух основных технологических операций ионно-плазменной обработки: предварительной ионной обработки поверхности конденсации; нанесения функционального покрытия с ионным ассистированием. Предварительная ионная обработка служит для нагрева поверхности конденсации до рабочей температуры, а также для очистки и активации поверхности конденсации покрытия. В промышленных установках могут быть реализованы различные способы наноструктурирования покрытий, использующие различные плазменные технологические устройства. Для нанесения покрытий на наружные рабочие поверхности широкое распространение получили планарные магнетронные распылительные системы несбалансированного типа – (НБПлМРС). Для обработки изделий с 3d геометрией оптимальны многокатодные магнетронные системы с обобщенным магнитным полем (closed field unbalanced magnetron) [5]. Находят применение интегрированные магнетронные системы с автономными источниками газовых ионов. Характерным признаком интегрированных плазменных технологических устройств является пространственное разделение функций генерации частиц покрытия и генерации ионов, ассистирующих процесс конденсации покрытия.

Имеется широкий класс деталей, на рабочие поверхности которых невозможно нанесение наноструктурированных покрытий при использовании распространенных технологий и магнетронных распылительных систем планарного типа. К таким деталям относятся элементы конструкции пар трения с внутренними рабочими поверхностями. Это детали гидравлических и пневмогидравлических машин и исполнительных механизмов. Разработка специализированных плазменных технологических устройств и технологии обработки подобных деталей, а также исследование особенностей их применения является целью настоящей работы.

Для ионно-плазменной обработки внутренних рабочих поверхностей были разработаны и защищены охранными документами магнетронные технологические устройства интегрированного типа [6-9]. Было разработано магнетронное устройство несбалансированного типа [10], предназначенное для обработки как внутренних, так и наружных рабочих поверхностей пар трения и деталей с 3d геометрией.

Конструктивные схемы устройств интегрированного типа представлены на рис. 1. Устройства типов «А», «С» и «D» предназначены для обработки деталей с внутренним диаметром 80-100 мм и более. Устройство типа «В» ориентировано на ионно-плазменную обработку трубчатых деталей малого (от 20 мм) внутреннего диаметра. Охарактеризуем особенности их конструкции и применения.

В плазменных технологических устройствах интегрированного типа «А» [6] и «В» [7] (см. рис. 1) распыляемыми катодами являются тонкостенные трубки, выполненные из материала покрытия. Материал покрытия может также наноситься на распыляемую поверхность катода любым способом (например, гальваническим хромированием). Обрабатываемое трубчатое изделие и соосный ему цилиндрический магнетрон нанесения покрытия устанавливаются в вакуумной камере неподвижно. Распыление материала катода производится ионной бомбардировкой в магнетронном разряде при возвратно-поступательном сканировании магнитной системы ЦМРС вдоль распыляемой поверхности трубчатого катода.

Катоды устройств «С» [8] и «D» [9] выполняются из массивного металла (или двух металлов). Для нанесения покрытия на протяженную внутреннюю поверхность используется относительное возвратно-поступательное перемещение плазменного устройства и обрабатываемого изделия.

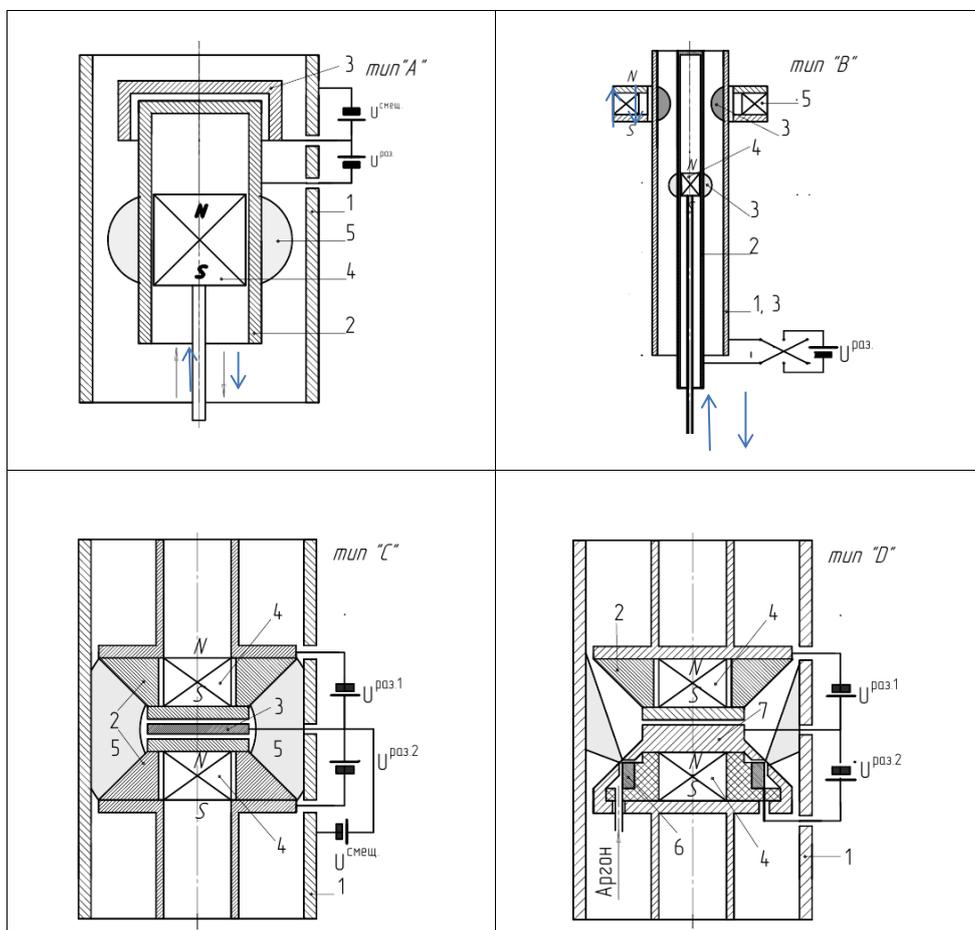


Рис. 1. Конструктивные схемы цилиндрических распылительных систем интегрированного типа:

- 1 – обрабатываемая трубчатая деталь; 2 – катод-мишень; 3 – анод магнетронного разряда;  
4 – магнитная система; 5 – область магнетронного разряда; 6 – анод автономного ионного источника (АИИ);  
7 – анод КМРС, катод АИИ

В устройстве типа «А» для предварительной подготовки поверхности в качестве источника металлических ионов используется вакуумно-дуговой разряд, который локализуется у торцевого анода. Магнетронный разряд служит для инициирования зажигания вакуумно-дугового разряда и для распыления поверхности трубчатого катода при возвратно-поступательном сканировании распыляемой поверхности катода внутренней магнитной системой цилиндрического магнетрона. Такое сочетание разрядов различных типов обеспечивает получение покрытий с хорошей, характерной для вакуумно-дуговой технологии, адгезией. Однако, присущее вакуумно-дуговому разряду свойство генерировать большое количество макрочастиц, снижает эффективность наноструктурирования покрытия.

Интегрированное технологическое устройство типа «С» содержит два МРС с обращенными друг к другу коническими катодами (КМРС). Противоположно ориентированные магнитные полюса магнетронов создают в пространстве между катодами обобщенную область магнитного поля. Плазма двух магнетронных разрядов локализуется между катодами и подложкой, что облегчает организацию режима ионного ассистирования покрытия. В устройстве такого типа имеется возможность нанесения биметаллических покрытий и ламинатных покрытий с чередующимися слоями.

Устройство типа «D» по компоновке аналогично устройству типа «С». В этом устройстве КМРС объединена с автономным ионным источником с замкнутым дрейфом электронов и узкой зоной ускорения (ускоритель с анодным слоем – УАС). Особенностью УАС является возможность работы как в режиме генератора плазмы, так и в режиме генератора ускоренных ионов, что расширяет технологические возможности плазменного технологического устройства.

Основными недостатками технологических устройств типов «А», «С», «D» является ограничение по обработке внутренних поверхностей малого диаметра, а также их конструктивная и эксплуатационная сложность.

Устройство типа «В» предназначено для обработки трубчатых деталей, выполненных из неферромагнитного материала. Это позволяет использовать для предварительной ионной обработки разряд инверсного цилиндрического магнетрона (ИнвЦМРС). Магнитная система ИнвЦМРС предварительной ионной обработки располагается за пределами внутренней полости детали, охватывая ее снаружи. Магнетронный разряд ИнвЦМРС для предварительной ионной обработки локализуется на внутренней поверхности детали и перемещается вместе с магнитной системой магнетрона вдоль поверхности конденсации покрытия. Анодом разряда служит катод ЦМРС для нанесения покрытия. При нанесении покрытия производится переключение полярности разрядного источника. В технологическом устройстве подобного типа минимальный диаметр обрабатываемой поверхности определяется величиной диаметра трубчатого катода ЦМРС нанесения покрытия плюс удвоенная величина разрядного промежутка. Так как характерный размер разрядного промежутка МРС с тонким катодом, как правило, примерно равен величине межполюсного зазора магнитной системы, при использовании постоянного магнита диаметром 6 мм и высотой 5 мм возможна обработка деталей с минимальным внутренним диаметром 16 мм или несколько меньше. В устройстве типа «В» не устранен недостаток, связанный с конструктивной сложностью.

Недостатки, органически присущие плазменным технологическим устройствам интегрированного типа, устранены в магнетронных распылительных системах несбалансированного типа. Принципы создания несбалансированного магнитного поля в планарной магнетронной распылительной системе были разработаны в [4]. В ПлМРС несбалансированного типа условия для изменения конфигурации магнитного поля в области

магнетронного разряда создаются путем усиления магнитного потока через наружный магнитный полюс. Такое изменение магнитного поля способствует выходу электронов за пределы магнитной ловушки. В результате амбиполярной диффузии объемный заряд электронов, покидающих магнитную ловушку, компенсируется ионами, уходящими вслед за электронами. В результате, у поверхности подложки формируется плазменное образование, из которого на находящуюся под отрицательным потенциалом подложку могут извлекаться газовые ионы ассистирования. В результате ионной бомбардировки происходит наноструктурирование покрытия. Состояние несбалансированности магнитного поля принято характеризовать параметром, численно равным расстоянию характерной точки  $Z_0$  от катода. Точка  $Z_0$  располагается на оси симметрии магнитной системы. В этой точке вектор нормальной составляющей магнитной индукции меняет направление на противоположное.

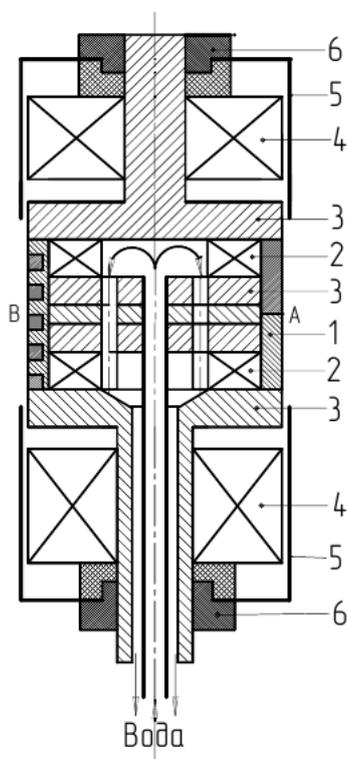


Рис. 2. Конструктивная схема несбалансированной цилиндрической магнетронной распылительной системы: 1 - катод-мишень; 2 - постоянные магниты; 3 - магнитные полюса; 4 - магнитные катушки; 5 - анод - защитный экран; 6 - изолятор

Принцип создания несбалансированного магнитного поля был применен при создании несбалансированной цилиндрической магнетронной распылительной системы (НБЦМРС) [10]. Несбалансированность магнитного поля создавалась установкой на торцевых магнитных полюсах дополнительных постоянных магнитов, усиливающих периферийный магнитный поток. Последовательно соединенные двухтрековые модули НБЦМРС могут использоваться для обработки протяженного трубчатого изделия. Имеется возможность создания модуля НБЦМРС с составным катодом. Варианты составного и фрагментированного катодов типа «А» и типа «В» показаны на рис. 2. Подобные катоды могут использоваться для нанесения биметаллических покрытий типа (Ti-Al)N.

В конструкции модуля НБЦМРС для усиления периферийного магнитного потока были применены электромагниты. Конструктивная схема элементарного модуля НБЦМРС с электромагнитами показана на рис. 2. При использовании электромагнитов, цилиндрическая распылительная система приобретает качества, несвойственные распылительной системе планарного типа. Рассмотрим это подробнее.

В МРС несбалансированного типа (как в планарной, так и в цилиндрической) имеется несоответствие характера распределения плотности тока ионов ассистирования, плотности потока атомных частиц в плоскости подложки. Рисунок 3d иллюстрирует характер этих распределений на подложке диаметром 100 мм при удалении подложки от катода МРС на 75 мм. Видно, что максимальный поток ионов ассистирования сосредоточен в центре подложки. Это может быть причиной существенного отличия условий ионного ассистирования на периферии и в центре подложки.

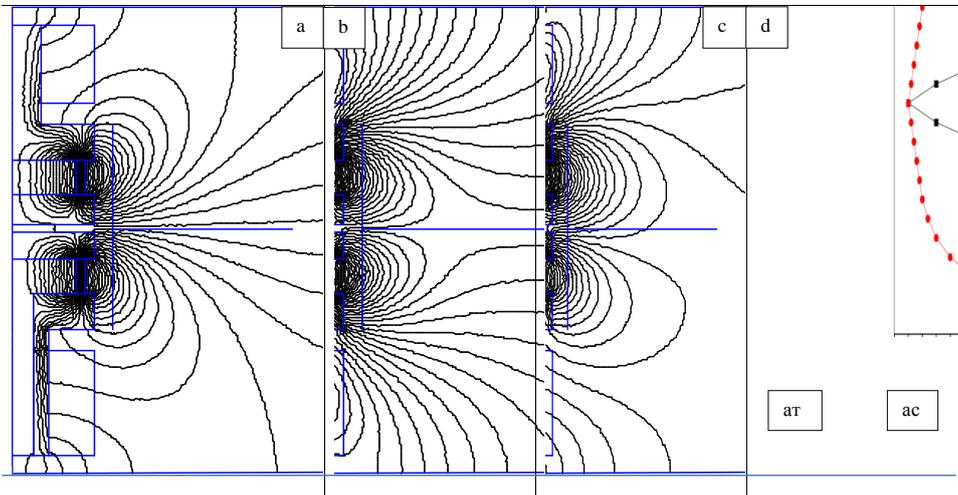


Рис. 3. Картина магнитного поля в несбалансированной цилиндрической магнетронной системе: а – картина сбалансированного магнитного поля в НБЦМРС; б – симметрично несбалансированное магнитное поле; с – асимметрично несбалансированное магнитное поле; d – характер распределения плотности тока ионов ассистирования (ac) и нейтральных атомов (ат) на подложке при нанесении покрытия в НБЦМРС

Дополнительные источники магнитного поля в виде электромагнитов позволяют управлять конфигурацией магнитного поля в области магнетронного разряда. На рис. 3а показана картина сбалансированного магнитного поля (электромагниты обесточены). Рисунок 3б иллюстрирует картину магнитного поля при симметричной несбалансированности магнитного поля (токи в электромагнитах равны). На рис. 3с показана картина магнитного поля при асимметричном характере несбалансированности (запитан только верхний электромагнит). Видно, что направление выхода электронов из магнитной ловушки изменяется. Таким образом было показано, что электромагниты позволяют управлять направлением потока ионов ассистирования.

НБЦМРС позволяет производить обработку деталей, удаленных от катода магнетрона на расстояние до 250 мм. Это позволяет использовать НБЦМРС для нанесения покрытий на внутренние и наружные рабочие поверхности. В стандартных технологических установках (например «Булат», ННВ) имеется возможность установки плазменного устройства на оси вакуумной камеры, что позволяет организовать обработку деталей 3d геометрии с помощью НБЦМРС. В этом случае желательно, чтобы оснастка для установки обрабатываемых изделий имела дополнительную функцию перемещения по высоте вакуумной камеры.

Плазменные устройства были испытаны. Получены образцы наноструктурированных покрытий. Выявлены некоторые особенности их эксплуатации. Так, для нагрева ионной бомбардировкой деталей массой 7-10 кг требуется времени больше, чем для их ионной очистки и активации. За время нагрева детали может происходить ионное травление прецизионных рабочих поверхностей, обработанных до чистоты  $R_a 0,1$ . Противоречие было разрешено применением гелия в качестве рабочего газа. Использовалось то, что коэффициент распыления для гелия существенно ниже, чем для аргона. Ионная очистка выполнялась ионами аргона.

При нанесении покрытий хрома, титана, алюминия и их нитридов с ионным ассистированием были получены покрытия с показателями микротвердости, существенно превышающими микротвердость массивного металла. Так микротвердость хромового покрытия достигала 18 ГПа. Микротвердость покрытия из титана ВТ1-1 равнялась – 10-11 ГПа. Титановый катод НБЦМРС со вставками из алюминия (см. рис. 2 «В») был

использован для получения покрытий Ti-Al и (Ti-Al)N. Получена микротвердость 12 ГПа и 38 ГПа соответственно. При нанесении хрома повышению напряжения смещения на подложке от 60 В до 200 В соответствовал рост микротвердости и одновременное падение темпа конденсации покрытия. Факт наноструктурированности полученных покрытий был установлен рентгеноструктурным анализом по уширению рефлекса хрома. Производилось наноиндентирование покрытий. Для покрытия хрома на титане значение отношения нанотвердости к приведенному модулю упругости составило величину 0,1145, что, согласно [11], свидетельствует о наноструктурированности покрытия.

Ионно-плазменная обработка внутренних поверхностей с использованием разработанных устройств магнетронного типа имеет свои особенности, изучение которых требует совершенствования конструкции технологических плазменных устройств.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Gleiter H. Nanostructured materials : basic concepts and microstructure / H. Gleiter // *Acta material.* – 2000. – V. 48. – P. 1-29.
2. Veprek S. L. Different approaches to superhard coatings and nanocomposites / S.L. Veprek, G.J. Maritz et. al. // *Thin Solid Films.* – 2005. – Vol. 476. – P. 1-29.
3. Musil J. The role of energy in formation of sputtered nanocomposite films / J. Musil, J. Šuna // *Mater. Scien. Forum.* – 2005. – Vol. 502. – P. 291-296.
4. Window B. Unbalanced magnetrons as sources of high ion fluxes / B. Window, N.J. Savvides // *Vac. Sci. Technol. A.* – 1986. – Vol. 4. – No 3. – P. 453-507.
5. Свадковский И. В. Направление развития магнетронных распылительных систем / И.В. Свадковский // *Доклады БГУИР.* – 2007. – №2(18). – С. 112-121.
6. Патент на изобретение 93833U, Украина, МПК C23C 14/00. Ионно-плазменное устройство «гибридного» типа / Гришкевич А.Д. ; заявитель и патентообладатель ИТМ НАНУ и ГКАУ. - a201005613 ; заявл.11.05.2010 ; опубл. 10.03.2011, №5.
7. Патент на полезную модель №38845U, Украина, МПК C23C 14/00. Плазменное устройство / Гришкевич А.Д. ; заявитель и патентообладатель ИТМ НАНУ и ГКАУ. – u200808700 ; заявл.01.07.2008 ; опубл. 26.01.2009, №2.
8. Патент на изобретение №93471, Украина, МПК C23C 14/35, 14/56. Ионно-плазменная установка / Гришкевич А.Д., Гринюк С.И.; заявитель и патентообладатель ИТМ НАНУ и ГКАУ – a201005669 ; заявл. 11.05.2010; опубл. 10.02.2010, №23.
9. Патент на полезную модель № 89038, Украина, МПК C23C 14/00. Ионно-плазменное устройство интегрированного типа для обработки внутренних поверхностей / Гришкевич А.Д. ; заявитель и патентообладатель ИТМ НАНУ і ГКАУ. - u2013 12584 ; заявл. 28.10. 2013. ; опубл. 24.01.2014 , №1.
10. Заявка a201312581 Украина, МПК C23C 14/00. Несбалансированная цилиндрическая магнетронная распылительная система / Гришкевич А.Д. ; заявитель и патентообладатель ИТМ НАНУ и ГКАУ. – Заявл. 06.11 2013.
11. Фирстов С. А. Современные возможности метода инструментального индентирования / С.А. Фирстов, В.Ф. Горбань, Э.Б. Печковский // *Вестник Тамбовского ГУ.* – 2013. – Т. 18. – № 2-4. – С. 1933-1934.

#### REFERENCE

1. Gleiter, H. (2000), “Nanostructured materials: basic concepts and microstructure”, *Acta material*, vol. 48, pp. 1-29.
2. Veprek, S.L., Maritz, G.J. et. al. (2005), “Different approaches to superhard coatings and nanocomposites”, *Thin Solid Films*, vol. 476, pp. 1-29.

3. Musil, J. and Šuna, J. (2005), "The role of energy in formation of sputtered nanocomposite films", *Mater. Scien. Forum*, vol. 502, pp. 291-296.
4. Window, B. and Savvides, N.J. (1986), "Unbalanced magnetrons as sources of high ion fluxes", *Vac. Sci. Technol. A.*, vol. 4, no. 3, pp. 453-507.
5. Svadkovski, I.V. (2007), "Directions of magnetron sputtering systems developments", *BGUIR reports*, no. 2(18), pp. 112-121.
6. A patent for an invention №93833U, Ukraine, IPC C23C 14/00. Ion-plasma device "hybrid" type / Grishkevich A. D. ; applicant and assignee Institute of Technical Mechanics of NSAU and SSAU. – a201005613 ; Filed 11.05.2010 ; Publication Date 10.03.2011, Bull. №5.
7. A patent for utility model №38845U, Ukraine, IPC C23C 14/00. Plasma device / Grishkevich A. D.; applicant and assignee Institute of Technical Mechanics of NSAU and SSAU. - u200808700; Filed 01.07.2008 ; Publication Date 26.01.2009, Bull. №2.
8. A patent for an invention №93471, Ukraine, IPC C23C 14/35, 14/56. Ion-plasma installation / Grishkevich A. D, Grinyuk S. I.; applicant and assignee Institute of Technical Mechanics of NSAU and SSAU. – a201005669; Filed. 11.05.2010 ; Publication Date. 10.02.2010, Bull. №23.
9. A patent for utility model № 89038, Ukraine, IPC C23C 14/00. Ion-plasma device type for the integrated treatment of internal surfaces / Grishkevich A. D ; applicant and assignee Institute of Technical Mechanics of NSAU and SSAU. - u2013 12 584; Filed. 28.10. 2013 ; Publication Date. 24.01.2014, Bull. №1.
10. Application a201312581 Ukraine, IPC C23C 14/00. Unbalanced cylindrical sputtering magnetron system / Grishkevich A.D. ; Appl. 06.11 in 2013, applicant and assignee Institute of Technical Mechanics of NSAU and SSAU.
11. Firstov, S.A., Gorban, V.F. and Pechkovski, E.P. (2013), "Sovremennyye vozmojnyj metody instrumentalnogo indentirovaniya", vol. 18, no. 2-4, pp. 1933-1934.

УДК 539.3, 539.8

## МЕТОД РЕШЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗАДАЧ УПРУГОЙ ДИФФУЗИИ С ПРОИЗВОЛЬНЫМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ

<sup>1</sup>Земсков А. В., к. ф.-м. н., доцент, <sup>2</sup>Тарлаковский Д. В., д. ф.-м. н., профессор

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), ул. Волоколамское ш., 4, Москва, 125993, Россия

<sup>2</sup>НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Мичуринский просп., 1, Москва, 119192, Россия

azemskov1975@mail.ru

Предлагается подход к решению начально-краевых задач упругой диффузии, основанный на построении интегральных соотношений, связывающих между собой правые части граничных условий различных типов. Предполагается, что одно из этих решений найдено. Тогда интегральные соотношения рассматриваются как уравнения относительно правых частей, эквивалентных другим условиям. Для их решения используются квадратурные формулы.

Ключевые слова: упругая диффузия, нестационарные задачи, преобразование Лапласа, упругий однокомпонентный слой, интегральные уравнения Вольтера.