

УДК 621.793.74

**Д. В. СЛЮСАРЬ, В. П. КОЛЕСНИК, Л. В. ЛИТОВЧЕНКО,
Н. П. СТЕПАНУШКИН, В. О. ГАРИН***Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***УПРАВЛЕНИЕ СОСТАВОМ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ
В ПЕРЕХОДНЫХ ЗОНАХ**

Показана необходимость разработки новых методов формирования двух- и трёхмерных функционально-градиентных покрытий. Сделан вывод о перспективности использования для решения стоящей задачи установок на основе инверсной магнетронной распылительной системы с газовым анодом, секционированными катодными узлами и осевыми потоками плазмы. Представлены и проанализированы результаты расчётно-аналитического эксперимента по выявлению влияния степени секционирования катодного узла исследуемой распылительной системы на возможность управления составом получаемых покрытий в различных точках на поверхности подложки. Даны рекомендации по выбору расположения секционированных катодов-мишеней в разрядном промежутке.

Ключевые слова: покрытие, инверсный магнетрон, функционально-градиентные покрытия, жаростойкие покрытия.

Введение

Функционально-градиентные материалы (ФГМ) - это класс материалов, отличительной чертой которых является плавное изменение физических свойств в каком-либо направлении. Общие свойства ФГМ являются уникальными и отличаются от свойств любого отдельного материала, который его образует [1]. В зависимости от того, в скольких направлениях изменяются свойства ФГМ, различают одно-, двух- и трёхмерные функционально-градиентные материалы [2].

Сфера использования ФГМ постоянно растёт, сейчас они применяются в оптоэлектронике, при создании новых термоэлектрических материалов [3]. Специалисты Департамента Энергетики США считают, что одним из перспективных направлений использования ФГМ является применение их для защиты деталей двигателей внутреннего сгорания и ГТД от высокотемпературной коррозии [4, 5, 6]. На пере лопаток перспективных ГТД в процессе работы возникают зоны с существенно различными условиями работы [7]. Выбор защитного покрытия в этом случае перерастает в трудно разрешимую проблему. Специалисты ВИАМ предлагают решать данную проблему путём формирования на различных участках поверхности лопатки покрытий различного состава и толщины в зависимости от условий, в которых они работают [7-10]. Данный метод они назвали методом конструирования покрытий. В ВИАМ был разработан ряд технологических процессов, которые предусматривают формирование покрытия в 2 стадии с применением технологических масок [11]. В этом случае между участками и

слоями с различными покрытиями отсутствуют переходные зоны. В процессе работы на их границах возникают значительные термические напряжения, приводящие в итоге к разрушению покрытия. Этого можно избежать путём использования функционально-градиентных покрытий. Благодаря их применению можно существенно снизить уровень напряжений в переходных зонах [12].

Однако применяемые сейчас методы нанесения покрытий позволяют формировать только одномерные функционально-градиентные покрытия, в то время как для реализации метода конструирования покрытий необходим метод, позволяющий формировать двух- и трёхмерные функционально-градиентные покрытия.

Одним из возможных методов решения данной задачи является использование нескольких электроннолучевых испарителей [13]. Но даже сами авторы отмечают ряд недостатков предложенного метода, основным из которых являются большие ограничения по регулированию скорости нанесения различных компонентов покрытия по поверхности подложки, что обусловлено достаточно большими размерами систем электронно-лучевого испарения.

Для решения поставленной задачи более подходит инверсная магнетронная распылительная система с газовым анодом, секционированным катодом и радиальными потоками плазмы, разработанная в Национальном аэрокосмическом университете им. Н. Е. Жуковского «ХАИ» [14]. Её отличительными особенностями являются: наличие множества катодов-мишеней, которые изготавливаются из компонентов, составляющих покрытие; большая площадь

обработки; возможность распыления магнитных материалов; высокий коэффициент использования материала катодов-мишеней. Данная установка позволяет формировать покрытие сложного состава путем совместного распыления катодов-мишеней, изготовленных из отдельных компонентов, входящих в его состав. Она позволяет регулирование состава многокомпонентных покрытий по толщине в процессе их формирования.

В то же время у этой распылительной системы имеется ряд недостатков. Из-за внешнего расположения обрабатываемых деталей относительно источника плазмы, их обработка происходит только с одной стороны, что приводит к возможности адсорбции частиц остаточной атмосферы на их поверхности [15]. Кроме того, это приводит к существенному ограничению возможности реализации процесса формирования двух- и трёхмерных функционально-градиентных покрытий, снижению скорости обработки и необходимости применения сложных и ненадёжных планетарных систем вращения подложек.

Следующим шагом на пути решения проблемы формирования данного типа покрытий стала разработка в Национальном аэрокосмическом университете им Н. Е. Жуковского «ХАИ» новой схемы инверсной магнетронной распылительной системы с газовым анодом, секционированными катодными узлами и осевыми потоками плазмы [16, 17]. Она совмещает в себе достоинства распылительной системы с радиальными потоками плазмы, но лишена ее недостатков. Она позволяет в полной мере независимо контролировать процесс нанесения покрытия на обе стороны подложки; позволяет отказаться от применения планетарных систем вращения подложек; в процессе нанесения покрытия вся поверхность подложек постоянно находится в зоне обработки.

В то же время, как любая новая система, для дальнейшего совершенствования она нуждается в детальном исследовании.

Постановка задачи исследования

Как показали исследования образцов с модельным покрытием, полученные при помощи исследуемой распылительной системы [17], на длине подложки 160 мм при существующей конфигурации разрядного промежутка можно добиться максимальной разности концентрации элементов в двухкомпонентном покрытии ~30 %. Таким образом, максимальная скорость изменения состава покрытия при размещении секционированных катодных узлов на высотах $H = 0$ мм и $H = 440$ мм вдоль радиуса распылительной системы составила ~0,19 %/мм. Этого

достаточно для того, чтобы подтвердить возможность регулирования состава наносимого покрытия по поверхности подложки. В то же время для формирования переходной зоны на подложках небольшого размера такой скорости изменения состава покрытия может оказаться недостаточно. Таким образом, для успешного решения задачи формирования двух- и трёхмерных функционально-градиентных покрытий крайне важно повысить этот показатель.

Анализ факторов, влияющих на возможность управления составом покрытий в переходных зонах

Для упрощения управления составом наносимого покрытия и повышения производительности распылительной системы в целом необходимо расширять диапазон регулирования плотности тока на отдельных секциях секционированного катода-мишени. Плотностью ионного тока на секции катода-мишени можно управлять, подавая на неё запирающий или задерживающий потенциал. И если минимальной плотности тока на секции катода-мишени можно легко добиться, подав на неё запирающий потенциал, то максимальная плотность тока ограничена плотностью ионов над ее поверхностью. Таким образом, секционированные катоды-мишени следует размещать в таких зонах разрядного промежутка, где плотность ионов максимальна и имеет наиболее равномерное распределение.

Анализ графика распределения плотности ионов для исследуемой распылительной системы (рис. 1) позволяет сделать вывод, что расположение секционированных катодов на высотах $H = 0$ мм и $H = 440$ мм не является оптимальным.

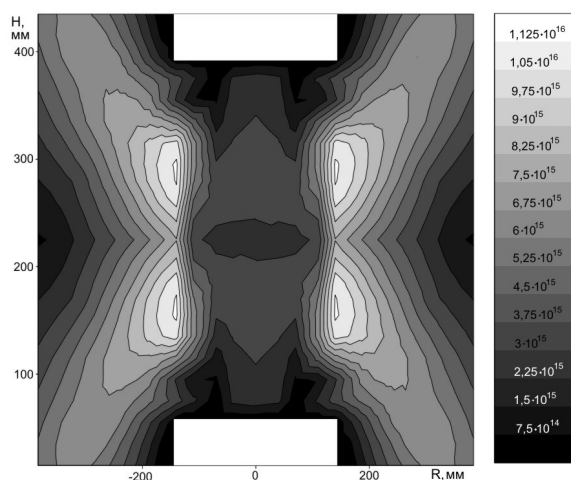


Рис. 1. Распределение плотности ионов в разрядном промежутке, $1/\text{м}^3$

Распределение плотности ионов в этих областях имеет достаточно неравномерный характер (рис. 2), что, в свою очередь, привело к неравномерному распределению плотности тока на катодах-мишенях при одинаковом потенциале, подаваемом на них, в зависимости от расстояния от оси распылительной системы (рис. 3).

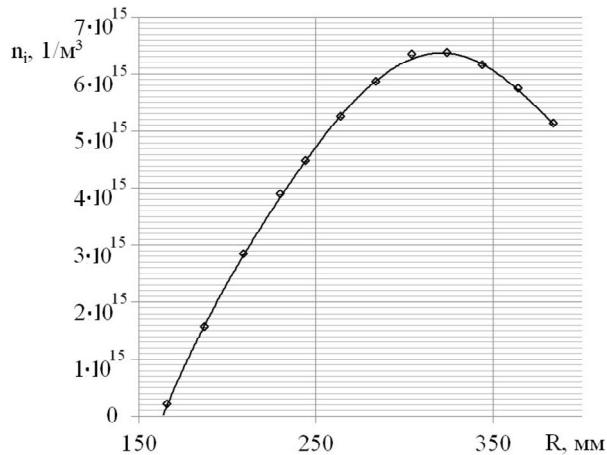


Рис. 2. Распределение плотности ионов в зависимости от расстояния от оси распылительной системы на высотах $H = 15$ мм и $H = 425$ мм, $1/\text{м}^3$

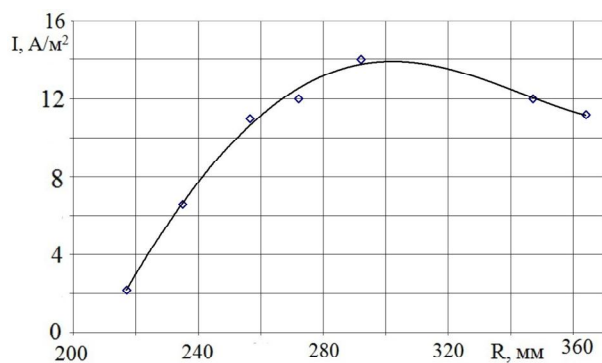


Рис. 3. Зависимость плотности тока на катодах-мишенях от расстояния от оси распылительной системы

Для исследуемой распылительной системы неравномерность плотности ионов в зоне расположения секционированных катодов-мишеней составила ~63 %. После проведения исследования распределения плотности ионов в зависимости от расстояния от оси системы для различных высот был сделан вывод о том, что целесообразно размещать секционированные катоды-мишени на высотах 75 мм и 365 мм. Таким образом, можно снизить неравномерность плотности ионов в зоне их размещения до ~33 % (рис. 4).

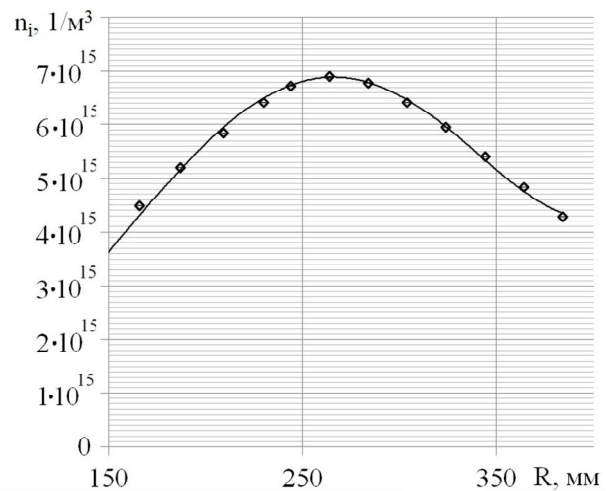


Рис. 4. Распределение плотности ионов в зависимости от расстояния от оси распылительной системы на высотах $H = 75$ мм и $H = 365$ мм, $1/\text{м}^3$

Для того, чтобы уменьшить размеры переходной зоны между участками на подложке с различным составом покрытия в результате того, что распыление материала катодов-мишеней происходит в соответствии с косинусным законом распределения направления разлёта распылённых частиц, необходимо сократить расстояние между поверхностью секционированных катодов-мишеней и обрабатываемыми образцами.

В результате, перемещая секционированные катоды-мишени с высот $H = 0$ мм и $H = 440$ мм на высоты $H = 75$ мм и $H = 365$ мм соответственно, мы решаем сразу обе задачи: выравниваем распределение плотности тока на катодах-мишенях вдоль радиуса распылительной системы и уменьшаем размеры переходной зоны между участками на подложке с различным составом покрытия. Как показали расчёты, проведённые в соответствии с методикой, изложенной в [16], такое изменение расположения секционированных катодов-мишеней действительно даёт возможность существенно увеличить разности концентраций элементов в различных зонах на подложке с двухкомпонентным покрытием и позволяет увеличить максимальную скорость изменения состава до 0,35 %/мм (рис. 5), т.е. на 84%.

Кроме того, уменьшение расстояния между подложками и катодами-мишенями приводит к существенному увеличению скорости нанесения покрытия с $2,8 \cdot 10^{-6}$ кг/м²·с до $4,2 \cdot 10^{-6}$ кг/м², т.е. на 50 %, что является ещё одним положительным моментом, говорящим в пользу целесообразности изменения расположения секционированных катодов-мишеней.

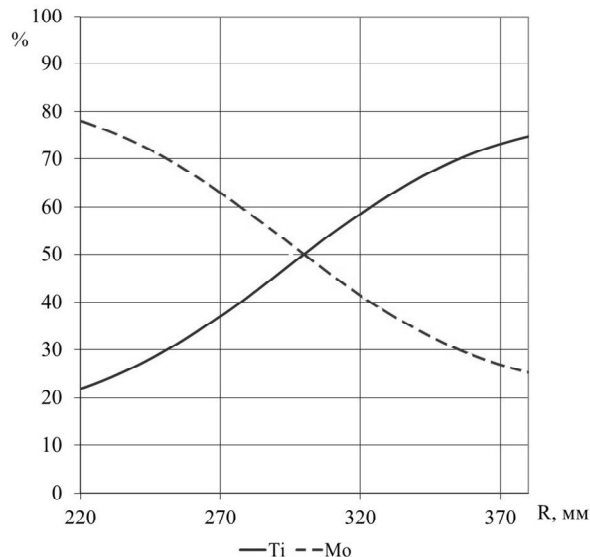


Рис. 5. Распределение элементов в составе покрытия в зависимости от расстояния от оси распылительной системы при расположении секционированных катодов на высотах $H=75$ мм и $H=365$ мм для случая секционированных катодов-мишеней, состоящих из 4 колец

При нанесении модельного покрытия на образцы применялись катодные узлы, состоящие из двух колец катодов-мишеней [17]. При проведении расчётов состава покрытия также считалось, что используются такие же катодные узлы. В то же время в подобных системах степень секционирования катодов-мишеней в радиальном направлении можно существенно увеличить. Благодаря чему можно получить дополнительные возможности по регулированию состава наносимых покрытий по длине изделия. Достигается это путём независимого регулирования тока на отдельные катоды-мишени, входящие в катодные узлы.

В ходе расчётно-аналитического эксперимента, в ходе которого применялась методика расчёта скорости нанесения и состава покрытия, изложенная в [16], рассматривались случаи применения катодного узла, содержащего 4 и 8 колец катодов-мишеней.

Было рассчитано распределение химических элементов по длине образца при различных токах через отдельные секции секционированного катодного узла. Расчёты показали, что в этом случае можно путём регулирования тока через различные секции катодного узла увеличить разность концентраций молибдена и титана на противоположных концах образца с 56 % (случай с 2 кольцами катодов-мишеней) до 90 % (рис. 6), и достичь скорости изменения состава покрытия 0,5 %/мм. Т.е. в результате перемещения секционированных катодов-мишеней в технологическом отсеке и повышения

степени их секционирования возможно увеличение скорости изменения состава покрытия на 61 %.

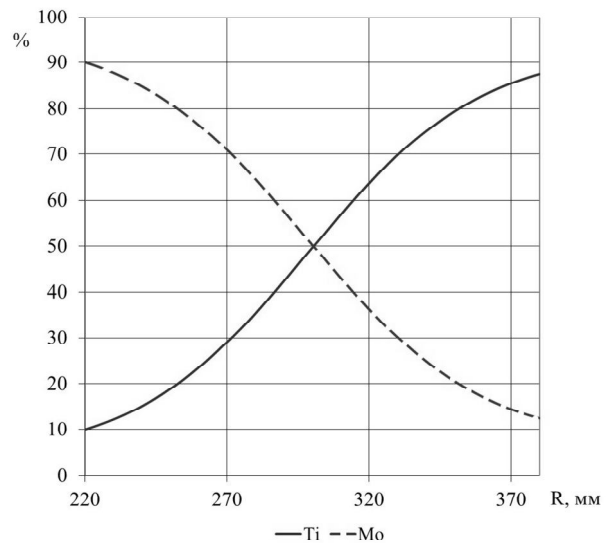


Рис. 6. Распределение элементов в составе покрытия в зависимости от расстояния от оси распылительной системы при расположении секционированных катодов на высотах $H=75$ мм и $H=365$ мм для случая секционированных катодов-мишеней, состоящих из 8 колец

Кроме того, увеличение степени секционирования даёт возможность управлять местом положения переходных зон по длине подложки и их количеством. То есть увеличение степени секционирования катодных узлов значительно расширяет возможности по управлению составом получаемых покрытий.

Заключение

Расчётно-аналитический эксперимент показал целесообразность перемещения секционированных катодных узлов в зоны с большей равномерностью плотности ионов вдоль радиуса распылительной системы. Также было показано, что уменьшение расстояния между катодами-мишенями и подложками позволяет увеличить скорость нанесения покрытия на 50 % и повысить возможность регулирования концентрации отдельных элементов, входящих в состав покрытия, в различных зонах на поверхности подложки. Кроме того было показано, что увеличение степени секционирования катодных узлов положительно сказывается на возможности регулирования компонентного состава по поверхности подложки. Была показана возможность увеличения скорости изменения состава покрытия в переходных зонах на 61 %.

Литература

1. *Functionally Graded Material: An Overview [Text]* / Rasheedat M. Mahamood, Esther T. Akinlabi, Mukul Shukla, Sisa Pityana // *Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol III WCE 2012, July 4–6. – 2012. – London, U.K. – P. 1593–1597.*
2. *Application of functionally graded materials in optoelectronic devices [Text]* / M. Wosko, B. Paszkiewicz, T. Piasecki, A. Szyszka, R. Paszkiewicz, and M. Tlaczala // *Optical Application. – 2005. – Vol. 35, No. 3. – P. 663–667.*
3. *Bharti, I. Novel Applications of Functionally Graded Nano, Optoelectronic and Thermolectric Materials [Text]* / I. Bharti, N. Gupta, K. M. Gupta // *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing. – 2013. – Vol. 1, No. 3. – P. 221–224.*
4. *Mahmoud, N.-A. Elastic–plastic analysis of two-dimensional functionally graded materials under thermal loading [Text]* / N.-A. Mahmoud, I.E. Khaled Ahmed, H.-A. Ibraheem // *International Journal of Solids and Structures. – 2009. – 46. – P. 2774–2786.*
5. *Mahmoud, N.-A. Reduction of thermal stresses by developing two-dimensional functionally graded materials [Text]* / N.-A. Mahmoud // *International Journal of Solids and Structures – 2003. – 40. – P. 7339–7356.*
6. *Maurice, D. 3-D Functionally Gradient Coatings for Components in Advanced Combustion Systems [Электронный ресурс]* / D. Maurice, J. Hawk. – Режим доступа: <http://www.nrel.gov/business/crada/pdfs/PON-13-011-3D-gradient-coatings.pdf>. – 08.01.2014.
7. *Каблов, Е. Н. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей [Текст]* / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджян, С. А. Будинковский, А. Н. Луценко // – *Металлы. – 2007. – №5. – С. 23–34.*
8. *Каблов, Е. Н. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД [Текст]* / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджян // *В сб. : Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-технич. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). – М. : Наука. 2012. – С. 60–70.*
9. *Перспективы применения в авиадвигателестроении ионной технологии [Текст]* / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджян, А. М. Сулима, Ю. Д. Ягодкин и др. // *Авиационная промышленность. – 1992. – № 9. – С. 9-12.*
10. *Kolomytsev, P. T. Combined coating for turbine blades of high-temperature gas turbine engines [Text]* / P. T. Kolomytsev, V. M. Samoilenko // *Metal Science and Heat Treatment. – 2006. – Vol. 48, № 11–12. – P. 558–561.*
11. *Budinovskii, S. A. Efficiency of two-stage ion-plasma process for depositing alloyed diffusion aluminate coatings on high-temperature nickel alloys [Text]* / S. A. Budinovskii, S. A. Muboyadzhyan // *Metal Science and Heat Treatment. – 2003. – Vol. 45, № 5–6. – P.183–188.*
12. *Cracks in functionally graded materials [Text]* / H.-A. Bahr, H. Balke, T. Fett, I. Hofinger, G. Kirchhoff, D. Munz, A. Neubrand, A.S. Semenov, H.-J. Weiss, Y.Y. Yang // *Materials Science and Engineering. – 2006. – A362. – P. 2–16.*
13. *Костржицкий, А. И. Многокомпонентные вакуумные покрытия [Текст]* / А. И. Костржицкий, О. В. Лебединский. – М. : Машиностроение, 1987. – 208 с.
14. *Колесник, В. В. Разработка и исследование технологического процесса и оборудования для формирования многокомпонентных покрытий на лопатки ГТД [Текст]* : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.07 / Колесник Валерий Владимирович. – Харьков, 2007. – 137 с.
15. *Слюсарь, Д. В. Интегральные характеристики разряда в инверсном магнетроне с газовым анодом, секционированными катодными узлами и осевыми потоками плазмы [Текст]* / Д. В. Слюсарь // *Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 2(109). – С. 91–95.*
16. *Управление процессом нанесения жаростойких покрытий на лопатки газотурбинных двигателей [Текст]* / В. П. Колесник, Д. В. Слюсарь, В. В. Колесник, В. В. Зиновьев // *Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 7(54). – С. 36–40.*
17. *Колесник, В. П. Нанесение многокомпонентных покрытий с управляемым компонентным составом по длине изделия [Текст]* / В. П. Колесник, В. В. Колесник., Д. В. Слюсарь // *IX Международный симпозиум по радиационной плазмодинамике : сб. науч. тр. – М. : НИЦ "Инженер", 2012. – С. 233-238.*

Поступила в редакцию 11.11.2013, рассмотрена на редколлегии 18.11.2015

УПРАВЛІННЯ СКЛАДОМ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНИХ ПОКРИТТІВ В ПЕРЕХІДНИХ ЗОНАХ

*Д. В. Слюсар, В. П. Колесник, Л. В. Литовченко,
М. П. Степанушкін, В. О. Гарін*

Показано необхідність розробки нових методів формування дво- і тривимірних функціонально-градієнтних покриттів. Зроблено висновок про перспективність використання для рішення цієї задачі установок на основі інверсної магнетронної розпорошувальної системи з газовим анодом, секціонованими катодними вузлами і осьовими потоками плазми. Представлено і проаналізовано результати розрахунково-аналітичного експерименту з виявлення впливу ступеня секціонування катодного вузла досліджуваної розпорошувальної системи на можливість керування складом одержуваних покриттів в різних точках на поверхні підкладки. Дано рекомендації по вибору розташування секціонованих катодів-мішеней в розрядному проміжку.

Ключові слова: покриття, інверсний магнетрон, функціонально-градієнтні покриття, жаростійкі покриття.

COMPOSITION CONTROL OF FUNCTIONAL-GRADIENT COATINGS IN CONVERSION AREAS

*D. V. Sliusar, V. P. Kolesnik, L. V. Litovchenko,
N. P. Stepanushkin, V. O. Garin*

The necessity of development of new methods of forming of two- and three-dimensional functional-gradient coatings is shown. A conclusion about perspective of the use for the decision of standing task of plants on the basis of the inversion magnetron sputtering system with a gas anode, partitioned cathode units and axial plasma flows is done. Are presented and analyzed the results of computation-analytical experiment on the effect of degree of sectioning of cathode-target unit of the explored sputtering system on possibility of management by composition of the deposited coatings in various points on the surface of substrate. Recommendations on the choice of location of partitioned cathode units in discharge interval are given.

Key words: coating, inverse magnetron, functional-gradient coatings, heat-resistant coating.

Слюсарь Денис Витальевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. 402, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: dv_slusar@yahoo.co.uk.

Колесник Владимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, начальник НИЧ, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: v.kolesnik@khai.edu.

Литовченко Леонид Васильевич – ст. науч. сотр., доцент, ст. науч. сотр. каф. 402, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: paralv@i.ua.

Степанушкін Николай Петрович – ст. науч. сотр. каф. 402, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail:

Гарин Вадим Олегович – ст. науч. сотр. каф. 104, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: garin.vadim@gmail.com.