

УДК 621.793.74

Д. В. СЛЮСАРЬ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЯДА В ИНВЕРСНОМ МАГНЕТРОНЕ С ГАЗОВЫМ АНОДОМ, СЕКЦИОНИРОВАННЫМИ КАТОДНЫМИ УЗЛАМИ И ОСЕВЫМИ ПОТОКАМИ ПЛАЗМЫ

Показана необходимость использования контролируемого метода нанесения покрытий для реализации принципа конструирования 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 измерения интегральных характеристик исследуемой распылительной системы в зависимости от давления плазмообразующего газа и величины индукции магнитного поля в разрядном промежутке. Показано, что вольтамперные характеристики исследуемой распылительной системы и их изменение в зависимости от основных параметров, влияющих на ее работу, сходны по своему характеру с другими магнетронными распылительными системами. Даны рекомендации по выбору параметров ее работы.

Ключевые слова: покрытие, инверсный магнетрон, конструирование покрытий, контролируемое нанесение, жаростойкие покрытия.

Введение

Совершенствование газотурбинных двигателей (ГТД) с целью повышения их удельной характеристики является одной из актуальнейших задач, стоящих перед разработчиками авиационной техники. Добиться существенного их увеличения исключительно благодаря совершенствованию конструкции ГТД без разработки новых технологий их производства невозможно. В особенности это касается лопаток ГТД, как элементов конструкции, работающих в наиболее тяжёлых условиях.

Для лопаток ГТД 5 поколения характерно возникновение на профиле пера лопаток различных зон, отличающихся друг от друга уровнем температур, напряжений и знаком этих напряжений. По этой причине покрытие одного типа не может эффективно защищать всю поверхность лопатки от высокотемпературной коррозии. Решить эту задачу можно путем контролируемого нанесения покрытия, т.е. такого технологического процесса, при котором возможно получать покрытие различного химического состава и толщины на различных участках подложки. Это позволит реализовать принцип конструирования покрытий, когда производится профилирование толщины покрытия в различных зонах на поверхности пера лопатки и используются покрытия различного типа в зависимости от условий их работы в этих зонах [1].

К настоящему времени были предприняты попытки разработки новых технологических процес-

сов, использующих уже существующее технологическое оборудование, для решения данной задачи. Так был разработан технологический процесс нанесения жаростойкого покрытия с использованием установки серии МАП [2]. Данный технологический процесс предусматривает нанесение жаростойкого покрытия в два этапа с использованием дополнительных масок для создания необходимого профиля покрытия [3]. Но этот техпроцесс весьма трудоёмкий и не обладает необходимой гибкостью, что крайне важно при переходе от одного типоразмера лопаток к другому.

Также в литературе описаны возможные пути решения задачи контролируемого нанесения покрытий путем использования нескольких электроннолучевых испарителей [4]. Но даже сами авторы отмечают ряд недостатков предложенного метода, основными 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» [5]. 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. Можно проводить регулирование состава многокомпонентных покрытий по толщине в процессе их формирования.

В то же время у этой распылительной системы имеются некоторые недостатки. Из-за внешнего расположения обрабатываемых деталей относительно источника плазмы, они могут одновременно обрабатываться только с одной стороны, что приводит к возможности адсорбции частиц остаточной атмосферы на их поверхности (при давлении в технологическом отсеке $\sim 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па для образования на поверхности подложки мономолекулярного слоя адсорбированных газов необходимо время 0,1 с [6]) и последующему их попаданию в состав полученного покрытия. Даже в случае проведения эффективной предварительной очистки поверхности подложек, это может приводить к отклонению химического состава покрытия от заданного. Так, например, такие металлы как цирконий, титан, гафний, ванадий, ниобий, тантал, хром, молибден, вольфрам и железо хемосорбируют при комнатной температуре кислород, водород, окись углерода, углекислый газ, углеводороды и азот; алюминий и медь хемосорбируют кислород, углеводороды и окись углерода [6]. Кроме того, это приводит к существенному ограничению возможности реализации процесса контролируемого нанесения покрытий, снижению скорости обработки и необходимости применения сложных и ненадежных планетарных систем вращения подложек.

Следующим шагом на пути решения проблемы реализации технологического процесса контролируемого нанесения 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 [7, 8]. Она совмещает в себе достоинства инверсной магнетронной распылительной системы с газовым анодом, секционированным катодом и 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

Для оптимального выбора режима работы распылительной системы очень важно знать, как влияют различные факторы на режим ее работы. Задачей данного исследования является выявление характера влияния таких факторов как: давление плазмообразующего газа, величина магнитной индукции в разрядном промежутке на основные параметры работы распылительной системы.

Разрядные характеристики источника плазмы

В ходе экспериментов было установлено, что разряд в исследуемой системе зажигается при давлении плазмообразующего газа (Ar) не ниже $3,33 \cdot 10^{-2}$ Па и переходит в дуговой режим при давлении выше $1 \cdot 10^{-2}$ Па. Зона устойчивой работы распылительной системы лежит в пределах $4,67 \cdot 10^{-2} \dots 8 \cdot 10^{-2}$ Па.

Типичная вольтамперная характеристика инверсной магнетронной распылительной системы с газовым анодом, секционированным катодом и осевыми потоками плазмы представлена на рис. 1. При снятии вольтамперных характеристик все катодные узлы нижней группы, также как катодные узлы верхней, находились под одинаковым потенциалом.

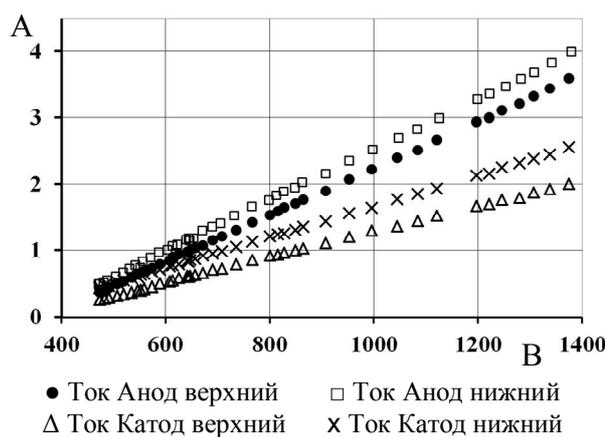


Рис. 1. Вольтамперная характеристика инверсной магнетронной распылительной системы с газовым анодом, секционированными катодными узлами и осевыми потоками плазмы при давлении плазмообразующего газа (Ar) $6,67 \cdot 10^{-2}$ Па

Вольтамперные характеристики для всех давлений плазмообразующего газа имеют линейный

характер. При малых давлениях вольтамперная характеристика сдвигается в область более высоких рабочих напряжений. Вид экспериментальных зависимостей аналогичен вольтамперным характеристикам магнетронных систем, работающих на постоянном токе [9, 10] и отличается только углом наклона кривых и положением их относительно горизонтальной оси напряжений.

При увеличении тока через соленоиды магнитной системы, что приводит к возрастанию величины магнитной индукции в разрядном промежутке распылительной системы, наблюдается увеличение тока разряда (рис. 2). Поскольку увеличение напряжённости магнитного поля продлевает время жизни электронов в разрядном промежутке, то при этом возрастает число их столкновений с атомами плазмообразующего газа. Таким образом, увеличение магнитной индукции в разрядном промежутке эквивалентно увеличению в нём давления плазмообразующего газа.

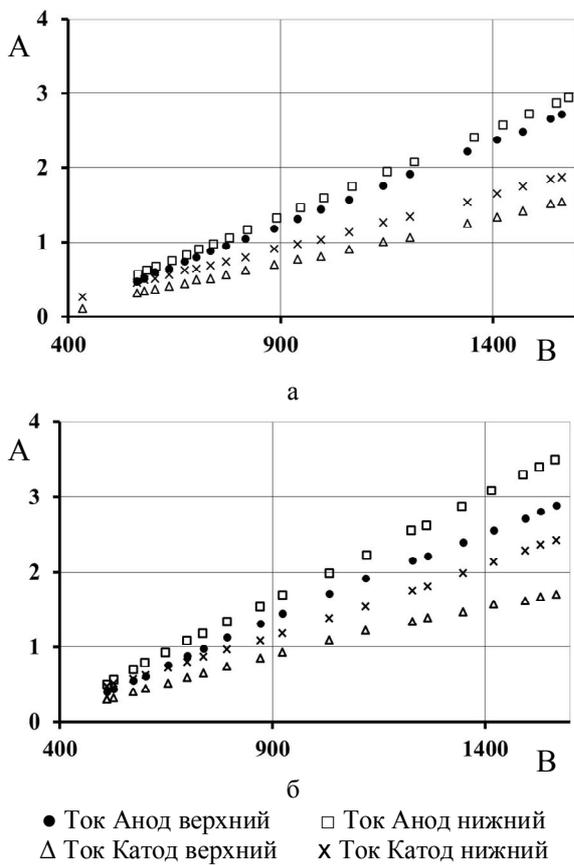


Рис. 2. Вольтамперные характеристики инверсной магнетронной распылительной системы с виртуальным газовым анодом, секционированным катодом и осевыми потоками плазмы при давлении плазмообразующего газа (Ar) $6,67 \cdot 10^{-2}$ Па:
 а – при токе через соленоиды 11 А;
 б – при токе через соленоиды 36 А

Было установлено, что при фиксированном напряжении на анодах и постоянной магнитной индукции в разрядном промежутке зависимости между суммарными анодным и катодным токами и давлением плазмообразующего газа также имеет линейный характер, что также характерно для магнетронных распылительных систем [10]. Типичные зависимости суммарных анодного и катодного токов от давления плазмообразующего газа представлены на рис. 3. Линейный рост разрядного тока при увеличении давления свидетельствует о классическом механизме дрейфа электронов по направлению к аноду.

Также было установлено, что токовый КПД (отношение суммарного катодного тока к суммарному анодному току) при фиксированном анодном напряжении возрастает прямо пропорционально увеличению давления плазмообразующего газа (рис. 4). Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности работы с исследуемой распылительной системы с точки зрения повышения ее эффективности при более высоких давлениях плазмообразующего газа. В то же время режим работы распылительной системы необходимо выбирать таким образом, чтобы на поверхности электродов не возникало микропробоев, что может приводить к попаданию микрокапель в состав получаемых покрытий, что в ряде случаев недопустимо.

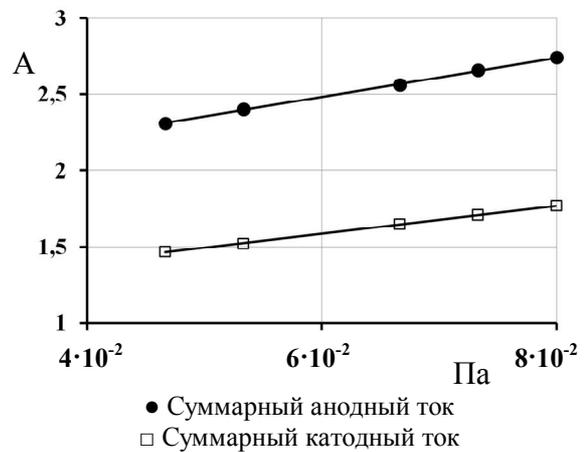


Рис. 3. Зависимости суммарных анодного и катодного токов от давления плазмообразующего газа (Ar) при напряжении на анодах 700 В

Кроме того, необходимо отметить, что токовый КПД возрастает по мере снижения напряжения на анодах. Так при напряжении на анодах 700 В и давлении плазмообразующего газа $8 \cdot 10^{-2}$ Па, токовый КПД составляет 64,8 %, в то время как при напряжении 1300 В и таком же давлении плазмообразующего газа только 61,3 %.

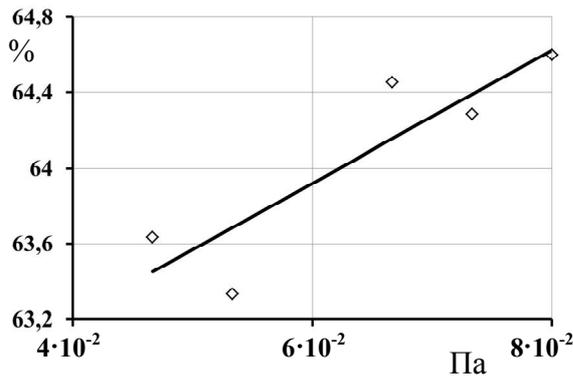
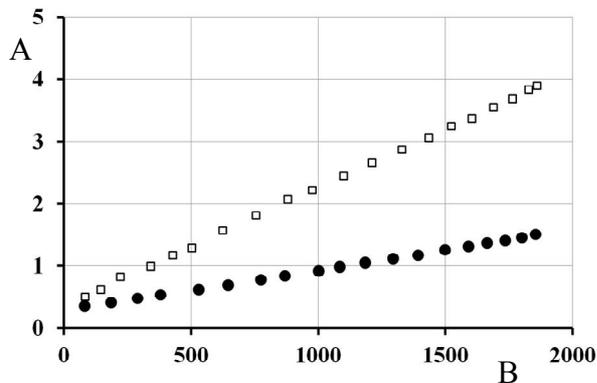


Рис. 4. Зависимость токового КПД от давления плазмообразующего газа (Ar) при напряжении на анодах 700 В

Была получена вольтамперная характеристика данной распылительной системы для случая работы только одной ее половины (рис. 5). Как видно из представленного графика, характер вольтамперной характеристики полностью сохранился, произошло лишь некоторое снижение токового КПД системы. Таким образом, можно сделать вывод о том, что обе половины распылительной системы слабо влияют друг на друга, т.е. работают практически независимо. Благодаря этому свойству с помощью данной распылительной системы можно независимо обрабатывать каждую из сторон детали.



● Ток Катод нижний □ Ток Анод нижний

Рис. 5. Вольтамперная характеристика инверсной магнетронной распылительной системы с газовым анодом, секционированным катодом и осевыми потоками плазмы в случае работы одной ее половины

Заключение

При исследовании разрядных инверсной магнетронной распылительной системы с газовым анодом секционированными катодными узлами и осевыми потоками плазмы установлено подобие ее вольтамперных характеристик вольтамперным характеристикам других систем со скрещенными $E \times B$

полями, что позволяет отнести ее к магнетронному классу. Изучены зависимости ее вольтамперных характеристик от давления плазмообразующего газа и магнитной индукции в разрядном промежутке. Выяснено, что увеличение давления плазмообразующего газа также, как и увеличение магнитной индукции в разрядном промежутке, приводит к увеличению разрядного тока, что тоже характерно для магнетронных распылительных систем. Показано, что токовый КПД незначительно растёт при повышении давления внутри технологического отсека, что говорит о целесообразности работы исследуемой распылительной системы при высоких давлениях плазмообразующего газа.

Сделан вывод, что каждая из половин распылительной системы может работать как самостоятельная распылительная система. Это позволяет использовать их независимо, что даёт возможность обрабатывать каждую из сторон подложки по индивидуальной программе.

Литература

1. 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, Nos. 11 – 12. – P. 558-561.
2. Пат. 2164549 Российская федерация, МКИ С 23 С 14/30. Способ испарения и конденсации токопроводящих материалов [Текст] / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский, Я. А. Помелов; заявитель и патентообладатель ВНИИМ № 99111127/02; Заявл. 1999.05.27; Оpubл. 27.03.01, Бюл. №7 (Пч.). – 3 с. : ил.
3. 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, No. 5–6. – P. 183-188.
4. Костржицкий, А. И. Многокомпонентные вакуумные покрытия [Текст] / А. И. Костржицкий, О. В. Лебединский. – М. : Машиностроение, 1987. – 208 с.
5. 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 : защищена 15.06.2007 : утв. 11.10.2007 / Колесник Валерий Владимирович. – Х., 2007. – 137 с.
6. Данилин, Б. С. Вакуумное нанесение тонких плёнок [Текст] / Б. С. Данилин. – М. : Энергия, 1967. – 312 с.
7. 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.

8. 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.

9. Данилин, Б. С. Исследование магнетронных

систем ионного распыления материалов [Текст] / Б. С. Данилин, В. К. Неволин, В. К. Сырчин // Физ.-хим. обработка материалов. – 1978. – № 2. – С. 33–39.

10. Минайчев, В. Е. Магнетронные распылительные устройства (магнетроны) [Текст] / В. Е. Минайчев, В. В. Одинокоев, Г. П. Тюфаева. – М.: ЦНИИ «Электроника», 1979. – 57 с.

Поступила в редакцию 25.12.2013, рассмотрена на редколлегии 12.03.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. каф. технологии производства ЛА С. И. Планковский, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ЛОКАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМИ В ІНВЕРСНОМУ МАГНЕТРОНІ З ГАЗОВИМ АНОДОМ, СЕКЦІОНОВАНИМИ КАТОДНИМИ ВУЗЛАМИ І ОСЬОВИМИ ПОТОКАМИ ПЛАЗМИ

Д. В. Слюсар

Показано необхідність використання контролюваного методу нанесення покриттів для реалізації принципу конструювання покриттів. Зроблено висновок про перспективність використання для вирішення задачі установок, що побудовано, на основі інверсних магнетронних розпилювальних систем з газовим анодом і секціонованими катодними вузлами. Представлено і проаналізовано результати вимірювання інтегральних характеристик досліджуваної розпилювальної системи залежно від тиску плазмоутворюючого газу та величини індукції магнітного поля в розрядному проміжку. Показано, що вольтамперні характеристики досліджуваної розпилювальної системи і їх зміна залежно від основних параметрів, які впливають на її роботу, подібні за своїм характером з іншими магнетронними розпилювальними системами. Дано рекомендації щодо вибору параметрів її роботи.

Ключові слова: покриття, інверсний магнетрон, конструювання покриттів, контрольоване нанесення, жаростійкі покриття.

INTEGRAL CHARACTERISTICS OF THE DISCHARGE IN THE INVERSE MAGNETRON WITH GAS ANODE, PARTITIONED CATHOD UNITS AND AXIAL PLASMA FLOWS

D. V. Slyusar

The necessity of the use of the controlled method of coatings deposition for realization of principle of constructing of 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 measuring the integral characteristics of the explored sputtering system depending on the pressure of the plasma gas and the magnitude of the magnetic field in the discharge gap. It is shown that the current-voltage characteristics of the explored sputtering system and its change depending on the main parameters affecting its work, similar in nature to other magnetron sputtering systems. Recommendations on the choice of parameters of its work are given.

Key words: coating, inverse magnetron, coatings constructing, controlled deposition, heat-resistant coating.

Слюсарь Денис Витальевич – ст. науч. сотр. каф. ракетно-космических двигателей и энергоустановок ЛА, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: begemot@d4.khai.edu.