

УДК 621.793.74

**В.П. КОЛЕСНИК, Д.В. СЛЮСАРЬ, В.В. КОЛЕСНИК, В.В. ЗИНОВЬЕВ***Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ НАНЕСЕНИЯ ЖАРСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ЛОПАТКИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Показана необходимость разработки новых распылительных систем для контролируемого нанесения многослойных многокомпонентных жаростойких покрытий на лопатки газотурбинных двигателей 4 и 5 поколений. Предложена новая распылительная система на основе ионного магнетрона с виртуальным анодом, секционированным катодом и осевыми потоками плазмы, позволяющая контролировать в широких пределах скорость нанесения любого из компонентов многокомпонентного покрытия в произвольной точке на поверхности подложки. Для данной распылительной системы разработана методика расчета скорости нанесения и состава многокомпонентного многослойного жаростойкого покрытия.

**жаростойкие покрытия, магнетронная распылительная система, катодное распыление**

### Введение

В настоящее время газотурбинные установки (ГТУ) широко используются как при создании двигательных установок летательных аппаратов, так и в наземной энергетике. Требования, предъявляемые к ним, постоянно растут. В первую очередь это касается удельной мощности и ресурса. Добиться существенного увеличения этих показателей благодаря только совершенствованию конструкции ГТУ практически невозможно. Таким образом, существует необходимость в разработке новых технологий и оборудования для их реализации, которые позволили бы производить детали ГТУ, способные работать в более жестких условиях.

### 1. Формулирование проблемы

Сейчас для защиты лопаток ГТУ от высокотемпературной коррозии широко применяются многокомпонентные жаростойкие сплавы. Так на ОАО «Мотор-Сичь» лопатки турбин покрываются многокомпонентными сплавами, в частности, СДП-2, в состав которого входят Ni, Cr, Al, Y. Многокомпонентные покрытия, содержащие до 25% Cr и 12 – 13% Al, характеризуются низкой диффузионной подвижностью компонентов [1], что способствует

их высокой термической стабильности.

Однако, для авиационных двигателей 4 и 5 поколения характерно значительное повышение тепловой напряженности лопаток турбины, что привело к возникновению на профиле пера лопаток различных зон, отличающихся друг от друга уровнем температур, напряжений и знаком этих напряжений. Различие условий работы покрытия на пера лопатки затрудняет выбор типа покрытия, т.к. к покрытию предъявляются противоречивые требования. В ряде случаев подбор защитного покрытия становится неразрешимой задачей. Решение данной проблемы возможно путем профилирования толщины покрытия по зонам на поверхности пера лопатки и использования покрытий различного типа в зависимости от условий их работы в этих зонах [2].

Исходя из этого, можно сформулировать требования к оборудованию для нанесения подобных покрытий. В связи с тем, что на различные участки поверхности лопатки необходимо наносить жаростойкое покрытие различного состава и толщины, необходимо управлять компонентным составом покрытия и скоростью его нанесения в зависимости от места расположения на поверхности защищаемого изделия.

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 многослойного жаростойкого покрытия с использованием установки МАП-1 [3].

Данный технологический процесс предусматривает нанесение жаростойкого покрытия в два этапа с использованием дополнительных масок для создания необходимого профиля покрытия на пере лопатки [4]. К сожалению, предложенный техпроцесс весьма трудоёмкий и не обладает необходимой гибкостью, что крайне важно при переходе от выпуска одного типоразмера лопаток к другому.

Также в литературе описаны возможные пути решения задачи контролируемого нанесения покрытий путем использования нескольких электроннолучевых испарителей [5]. Но даже сами авторы отмечают ряд недостатков предложенного метода, основным из которых является невозможность свободного регулирования скорости нанесения различных компонентов покрытия по поверхности подложки, что обусловлено достаточно большими размерами испарителей.

Гораздо лучше для решения поставленной задачи подходит распылительная система, разработанная в Национальном аэрокосмическом университете им Н.Е. Жуковского «ХАИ» [6], геометрия, которой близка к конструкции инверсного магнетрона [7]. Особенностью разработанной распылительной системы является:

- наличие множества распыляемых катодов-мишеней, которые можно изготавливать из компонентов составляющих покрытие;
- большая площадь обработки, за счет радиального электрического поля;
- возможность распыления магнитных сплавов, так как магнитное поле локализовано в прианодной области;
- высокий коэффициент использования материала, по сравнению с традиционными МРС.

Данная установка позволяет формировать покрытие путем совместного распыления катодов-мишеней, изготовленных из материалов компонентов покрытия и проводить регулировку состава многокомпонентных покрытий в процессе их формирования. Учитывая физические характеристики материалов, составляющих покрытие, площадь поверхности катодов-мишеней и изменение плотности тока на них, можно предварительно оценить получаемый состав покрытия [8].

В то же время у этой распылительной системы имеется ряд недостатков:

- необходимость использования планетарных систем вращения подложек для обеспечения равномерности нанесения покрытия, что значительно усложняет технологическую установку в целом;
- деталь может одновременно обрабатываться только с одной стороны, что приводит к возможности адсорбции частиц остаточной атмосферы на ее поверхности и последующему их попаданию в состав полученного покрытия;
- ограниченная возможность регулирования состава многокомпонентного покрытия по различным участкам поверхности детали.

Исходя из этого, можно сделать вывод о необходимости ее коренной переработки, для удовлетворения всех требований, выдвигаемых при контролируемом осаждении многокомпонентных жаростойких покрытий.

## 2. Решение проблемы

В Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» была предложена новая схема инверсной магнетронной распылительной системы (рис. 1).

Схема расположения катодов-мишеней изображена на рис. 2.

Из отдельных секций набирается сборный катод-мишень, имеющий форму диска. Катоды-мишени из одного и того же материала объединяются в отдель-

ные сектора, которые следуют один за другим с периодичностью от 1 до  $k$ , где  $k$  – это количество элементов составляющих покрытие.

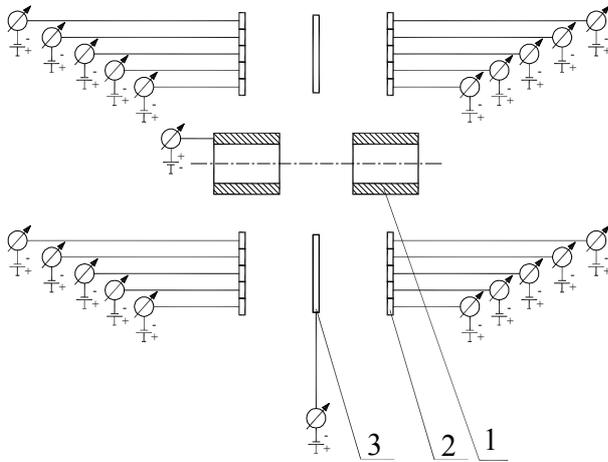


Рис. 1. Схема распылительной системы на базе ионного магнетрона с виртуальным анодом, секционированным катодом и осевыми потоками плазмы:

1 – анод; 2 – распыляемые мишени; 3 – подложки

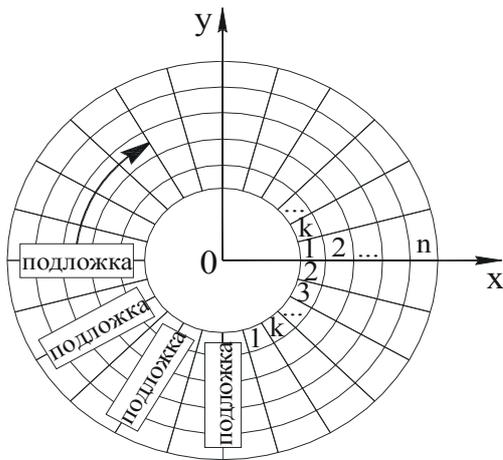


Рис. 2. Схема расположения катодов-мишеней

В свою очередь внутри сектора катоды-мишени также электрически изолированы друг от друга, что дает возможность регулировать потенциал на них независимо. Катоды мишени, состоящие из одинакового материала, находящиеся на одинаковом расстоянии от оси распылительной системы электрически объединяются в группы, т.е. при работе распылительной системы имеют одинаковый потенциал. Потенциал каждой группы катодов-мишеней регу-

лируется от независимого источника питания. Таким образом, в состав распылительной системы входит  $n$  групп катодов-мишеней каждого из элементов, входящих в состав покрытия. Подложки 3, на которые осаждается распыленный с мишеней материал, устанавливаются между двумя сборными катодами-мишенями. Во время нанесения покрытия подложки вращаются вокруг оси распылительной системы, что обеспечивает их последовательный проход над всеми катодами-мишенями. Потенциал к подложкам прикладывается от отдельного источника питания.

Благодаря возможности независимого регулирования потенциала, а значит и плотности тока, на каждой из групп мишеней в данной распылительной системе можно контролировать состав наносимого покрытия не только по толщине, но и по радиусу. Кроме того, благодаря тому, что рассматриваемая распылительная система фактически представляет собой две независимые распылительные системы, направленные навстречу друг другу, возможно обрабатывать каждую из сторон подложки независимо.

Для проведения процесса осаждения многокомпонентных многослойных покрытий с контролируемым по толщине и по поверхности составом возникает необходимость в разработке метода расчета скорости осаждения каждого из элементов, входящих в состав покрытия для произвольной точки на поверхности подложки.

Основными предположениями, которые были сделаны при выводе уравнения для расчета скорости осаждения покрытия:

- скорость распыления однородна по отдельно взятому катоду-мишени;
- эмиссия подчиняется закону косинусного распределения [10]

В аналитическом виде этот закон можно записать следующим образом:

$$dm_p(\varphi) = m_p \cos(\varphi) \frac{d\omega}{\pi}, \quad (1)$$

где  $dm_p(\varphi)$  – масса вещества испаряемого в направлении с углом  $\varphi$ , через поверхность, образованную пространственным углом  $d\omega$ ;

$\varphi$  – угол характеризующий направление испарения (между направлением и нормалью к поверхности испарения);

$d\omega$  – малый пространственный угол;

$m_p$  – масса материала эмитированного с единицы площади в единицу времени;

в) атомы материала покрытия незначительно рассеиваются в результате столкновений в газе;

г) атом материала осаждается в месте соударения с подложкой.

В случае использования катода-мишени кольцевой формы для нанесения покрытий магнетронным методом скорость осаждения можно найти, используя формулу [10]:

$$V_d = \frac{V_s H^2}{\pi} \times \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{R}{(R^2 + l^2 - 2lR \cos \Theta + H^2)^2} d\Theta dR, \quad (2)$$

где  $V_s$  – скорость распыления материала катода-мишени, кг/(с·м<sup>2</sup>);

$H$  – расстояние от поверхности катода-мишени до подложки;

$R_1$  – минимальный радиус катода-мишени;

$R_2$  – максимальный радиус катода-мишени;

$l$  – расстояние от оси распылительной системы до точки на подложке, в которой необходимо определить скорость нанесения покрытия.

Для расчета скорости распыления материалов при нормальном падении ионов можно пользоваться выражением:

$$V_s = \frac{j \cdot K_s(E_i) \cdot M_a}{e}, \quad (3)$$

где  $j$  – плотность ионного тока в сечении, перпендикулярном направлению падения ионов, А/см<sup>2</sup>;

$K_s(E_i)$  – коэффициент распыления материала, атом/ион;

$M_a$  – атомная масса атомов мишени, кг;

$e$  – заряд электрона (1,6·10<sup>-19</sup> Кл).

Таким образом, скорость осаждения покрытия для мишени кольцевой формы в конечном виде примет вид:

$$V_d = \frac{j \cdot K_s(E_i) \cdot M_a \cdot H^2}{e\pi} \times \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{R}{(R^2 + l^2 - 2lR \cos \Theta + H^2)^2} d\Theta dR. \quad (4)$$

Так как в нашем случае подложки совершают над поверхностью катодов-мишеней вращательное движение, как показано стрелкой на рис. 2, то при проведении расчетов можно сделать допущение, что скорость нанесения покрытия, обусловленная распылением мишеней изготовленных из элемента покрытия №*p*, состоящих в группе №*f*, будет равна:

$$V_{dp} = \frac{j_{pf} \cdot K_{spf}(E_i) \cdot M_{ap} \cdot H^2}{e \cdot k} \times \int_{R_{f1}}^{R_{f2}} \int_0^{2\pi} \frac{R}{(R^2 + l^2 - 2lR \cos \Theta + H^2)^2} d\Theta dR, \quad (5)$$

где  $p = 1 \dots k$ ,  $a, f = 1 \dots n$ ;

$j_{pf}$  – плотность ионного тока на катоды-мишени выполненные из элемента покрытия №*p*, объединенные в группу №*f*, А/см<sup>2</sup>;

$K_{spf}(E_i)$  – коэффициент распыления материала катода-мишени выполненного из элемента покрытия №*p*, находящегося в группе №*f*, атом/ион (необходимо отметить, что даже для одного и того же элемента входящего в состав покрытия, находящегося в различных группах катодов-мишеней, коэффициент распыления будет различным, так как каждая группа катодов мишеней находится под своим потенциалом);

$M_{ap}$  – атомная масса атомов мишени сделанной из элемента покрытия №*p*, кг;

$R_{f1}$  – минимальный радиус группы катодов-мишеней №*f*;

$R_{f2}$  – максимальный радиус группы катодов-мишеней №*f*;

Просуммировав скорости осаждения для каждого из элементов и для каждой группы катодов-мишеней, получим полную скорость осаждения для точки на поверхности подложки:

$$V_{d\Sigma} = \sum_{f=1}^n \sum_{p=1}^k \frac{j_{pf} \cdot K_{spf}(E_i) \cdot M_{ap} \cdot H^2}{e \cdot k} \times \int_{R_{f1}}^{R_{f2}} \int_0^{2\pi} \frac{R}{(R^2 + l^2 - 2lR \cos \Theta + H^2)^2} d\Theta dR. \quad (6)$$

### Заключение

Подводя итог, отметим, что предложенная инверсная магнетронная распылительная система с секционированными катодами и осевыми поттоками плазмы обладает следующими достоинствами:

- возможность управления составом наносимого на различные участки подложки покрытия;
- высокое качество наносимых покрытий, свойственное всем магнетронным распылительным системам;
- высокая скорость нанесения покрытий;
- возможность проведения эффективной ионной очистки подложек, что гарантирует хорошую адгезию получаемых покрытий;
- постоянное нахождение всей поверхности подложек в зоне обработки, что существенно затрудняет попадание атомов остаточной атмосферы в состав осаждаемых покрытий.

### Литература

1. Корнилов И.И. Физико-химические основы жаропрочности сплавов. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 516 с.
2. Kolomytsev P.T., Samoilenko V.M. Combined coating for turbine blades of high-temperature gas turbine engines. // Metal Science and Heat Treatment. – 2006. – Vol. 48, №. 11 – 12. – P. 558-561.

3. Пат. 2164549 Российская федерация, МКИ С 23 С 14/30. Способ испарения и конденсации токопроводящих материалов. / Е.Н. Каблов, С.А. Мубояджян, С.А. Будиновский, Я.А. Помелов; заявитель и патентообладатель ВНИИМ - № 99111127/02; Заявл. 1999.05.27; Опубл. 27.03.01, Бюл. №7 (Пч.) – 3 с.

4. Budinovskii S.A., Muboyadzhan S.A. Efficiency of two-stage ion-plasma process for depositing alloyed diffusion aluminide coatings on high-temperature nickel alloys // Metal Science and Heat Treatment. – 2003. – Vol. 45, Nos. 5 – 6. P. 183-188.

5. Костржицкий А.И., Лебединский О.В. Многокомпонентные вакуумные покрытия. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.: ил.

6. Колесник В.В. Разработка и исследование технологического процесса и оборудования для формирования многокомпонентных покрытий на лопатки ГТД: Дис... канд. техн. наук: 05.05.04. –Х., 2007. – 212 с.

7. Пакулин В.Н., Потехин С.Л., Месеняшин В.И. Тлеющий разряд в магнитном поле и магниторазрядные устройства вакуумного технологического оборудования // Обзоры по электронной технике. – 1984. – Сер. 7, вып. 10 (1035). – 60 с.

8. Формирование многослойных многокомпонентных защитных покрытий / Н.В. Белан, В.В. Колесник, С.С. Ивашенко, В.П. Колесник, Д.В. Слюсарь, А.Н. Прокопенко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 7(15). – С. 231-235.

9. Данилин Б.С., Киреев Ю.В. Получение пленок равномерной толщины при ионном распылении // Зарубежная электронная техника. – 1972. – Вып. 23. – С. 36-55.

Поступила в редакцию 10.05.2008

**Рецензент:** д-р. физ.-мат. наук, проф. А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.