

УДК 621.793.74

**Н.В. БЕЛАН¹, В.В. КОЛЕСНИК¹, В.П. КОЛЕСНИК¹, А.Н. ПРОКОПЕНКО²,
В.А. ПОДГОРНЫЙ¹**

¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

² *ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ

На основе проведенных экспериментальных исследований разработана модель расчета компонентного состава многокомпонентного покрытия. Предложено использовать эту модель для определения технологических параметров (плотности тока на группы катодов-мишеней; разрядного потенциала; величины запирающего потенциала) процесса формирования многокомпонентных покрытий различного стехиометрического состава.

многослойные покрытия, защитные покрытия, стехиометрия, ионное распыление, ионный магнетрон

Введение

Одними из главных причин разрушения узлов и деталей машиностроения являются тяжелые внешние условия их эксплуатации (повышенные температуры, вибрация, эрозия, коррозия и пр.), что вызывает необходимость поиска путей увеличения стойкости применяемых материалов. Особенно остро стоят эти вопросы в современном авиадвигателестроении, где используются весьма дорогостоящие материалы для изготовления деталей газотурбинных двигателей, преждевременный износ которых приводит к ощутимым материальным затратам. Анализ существующих методов обработки и защиты рабочих лопаток газотурбинных двигателей показал, что наиболее перспективным является метод нанесения защитных покрытий с помощью ионно-плазменной технологии.

1. Формулирование проблемы

В настоящее время одной из задач вакуумных технологий является получение многокомпонентных покрытий. Интерес к таким покрытиям вызван более широким спектром их свойств по сравнению с

однокомпонентными покрытиями. При формировании конденсатов на основе многокомпонентных материалов одной из основных проблем является получение покрытий заданного состава.

Сопоставляя особенности известных вакуумных методов формирования покрытий, необходимо отметить, что для формирования многокомпонентных конденсатов магнетронный метод ионного распыления обладает рядом безусловных преимуществ по сравнению с другими вакуумными методами. Одним из наиболее важных преимуществ магнетронных методов осаждения многокомпонентных покрытий является то, что пленки многокомпонентных материалов, полученные этими методами, в большинстве случаев имеют тот же состав, что и материал распыляемого катода [1, 2]. Однако довольно часто в состав жаропрочных сплавов входят химически активные элементы (например, алюминий, иттрий, и др.), которые реагируют с остаточной атмосферой в вакуумной камере. Поэтому для сохранения стехиометрии формируемого многокомпонентного покрытия возникает необходимость коррекции процентного содержания компонентов распыляемого сплава. Классические схемы магнетрон-

ных систем распыления, применяемых для получения многокомпонентных покрытий, предполагают использование катода из того же материала. Следовательно, для сохранения стехиометрии многокомпонентных покрытий в процессе их формирования необходимо, либо использовать катоды с скорректированным процентным составом химически активных элементов, либо вводить в рабочую зону дополнительные корректирующие катоды, что ведёт к усложнению конструкции технологического отсека и систем электропитания и является существенным недостатком.

2. Решение проблемы

Разработанная в ХАИ установка на базе ионного магнетрона с радиальными потоками плазмы [3] устраняет некоторые из упомянутых недостатков.

Она позволяет формировать покрытие путем совместного распыления катодов-мишеней, изготовленных из материалов компонентов покрытия и проводить регулировку стехиометрии многокомпонентных покрытий в процессе их формирования.

Учитывая физические характеристики материалов, составляющих покрытие, геометрию катодов-мишеней и изменение плотности тока на них, можно предварительно оценить состав покрытия. Была разработана модель расчета компонентного состава многокомпонентного покрытия для данного класса установок [4].

Данная модель позволяет решать и обратную задачу.

Следовательно, зная стехиометрический состав многокомпонентного покрытия определить технологические параметры процесса его формирования (плотность тока на группы катодов-мишеней; приложенную к разряду разность потенциалов; необходимую величину запирающего потенциала).

Для определения параметров технологического процесса необходимо выполнить следующие действия:

1. Для конкретной установки и материалов, из которых формируется многокомпонентное покрытие получить зависимости тока разряда от приложенного напряжения при остальных фиксированных параметрах.

2. Определить зависимость плотности тока на катодах-мишенях от приложенной к разряду разности потенциалов.

3. Выявить зависимость плотности тока на мишенях от запирающего потенциала на них (для каждого из этих материалов).

4. Рассчитать толщину каждого из компонентов, с учетом их процентного содержания в покрытии так, как будто эти компоненты осаждаются послойно:

$$\delta_i = \delta_{\Sigma} \cdot \frac{x_i}{100\%},$$

где δ_{Σ} – общая толщина многокомпонентного покрытия;

x_i – процентное содержание i -го компонента.

5. Получить графическую зависимость (рис. 1) при помощи выражения [4]:

$$\delta_i = K_{ui} \cdot K_p(E_i)_i \cdot \frac{S_m}{S_{\text{общ}}} \cdot \frac{A_i \cdot m_a}{\rho_i \cdot t} \cdot \frac{j_{ki}}{e} \cdot t_{\text{ос.}i},$$

где K_{ui} – коэффициент использования i -го распыляемого материала (учитывает потери массы на конструктивных элементах вакуумной камеры и определяется экспериментально);

S_{mi} – площадь поверхности i -го распыляемого компонента;

$S_{\text{общ}}$ – общая площадь поверхности, на которую наносится покрытие;

$K_{pi}(E_i)$ – коэффициент распыления i -го компонента, зависящий от энергии ионов плазмообразующего газа, бомбардирующих катод-мишень;

A_i – атомный вес i -го компонента;

ρ_i – плотность i -го распыляемого материала;

j_{ki} – плотность тока на i -ю группу мишеней;

$t_{oc.i}$ – время напыления i -го компонента.

Для рассчитанной толщины i -го компонента определить требуемую плотность тока на группу катодов-мишеней, изготовленных из этого компонента.

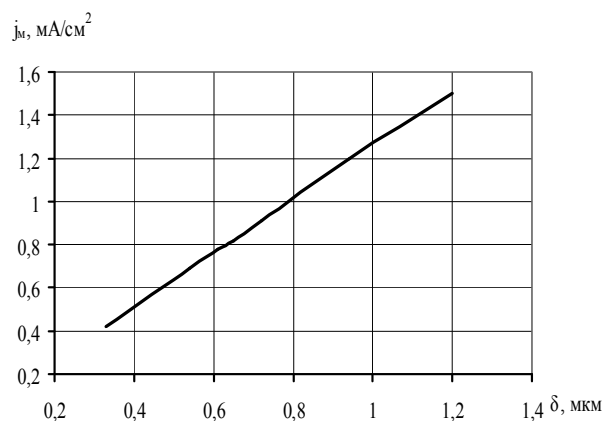


Рис. 1. Типичная зависимость толщины покрытия от плотности тока на катодах-мишенях

6. При условии, что общая плотность тока на всех группах катодов-мишеней определяется как сумма плотностей тока на каждой группе:

$$j_{M\Sigma} = \sum_{i=1}^n j_{Mi},$$

где j_{Mi} – плотность тока на i -ю группу катодов-мишеней.

Можно найти суммарную плотность тока на всех группах катодов-мишеней и воспользовавшись типичной зависимостью плотности тока на катодах-мишенях от приложенной к разряду разности потенциалов (рис. 2) определить необходимую величину потенциала.

7. По найденной плотности тока на катодах-мишенях, используя типичную зависимость плотности тока на мишенях от запирающего потенциала на них (рис. 3), оценить необходимую величину запирающего потенциала.

Таким образом, на основании выполненных расчетов определяются основные параметры технологического процесса, позволяющие получать многокомпонентные покрытия заданного стехиометрического состава.

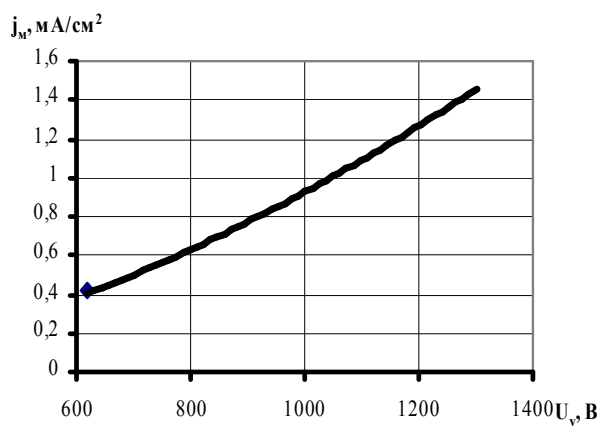


Рис. 2. Типичная зависимость плотности тока на катодах-мишенях от приложенной к разряду разности потенциалов

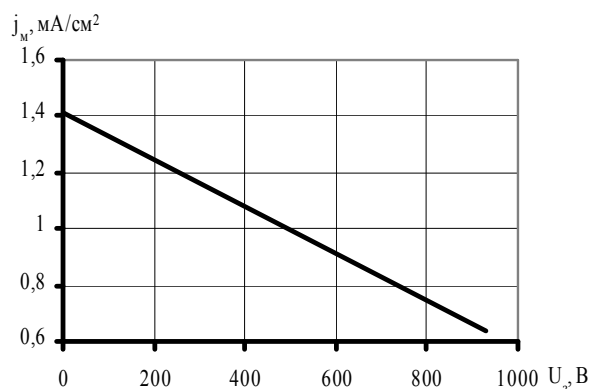


Рис. 3. Типичная зависимость плотности тока на мишенях от запирающего потенциала на них

Данные рекомендации по использованию модели расчета компонентного состава многокомпонентного покрытия для определения технологических параметров процесса его формирования разработаны на основе экспериментальных данных, полученных в процессе исследования лабораторной установки, проявляющей себя как ионный магнетрон с радикальными потоками плазмы [5].

Интервалы изменения параметров (тока и напряжения разряда, величины магнитного поля, смещения на подложке и т.д.) обусловлены характерными особенностями системы электропитания и конструкцией вакуумной камеры.

Для подтверждения предлагаемой методики была проведена серия экспериментов по формированию многокомпонентного покрытия типа $Co - (18...20)\%Cr - (5...7)\%Al - (0,3...0,4)\%Y$ [6].

В качестве иллюстрации достоверности методики рассмотрен случай увеличения процентного содержания алюминия до 15% и добавления никеля до 37%. Были рассчитаны технологические параметры процесса формирования покрытия. Рентгенофлуоресцентный анализ полученных образцов показал, что процентное содержание, добавляемых компонентов (алюминия и никеля) составляет 20,5% и 36,4%, соответственно.

Таким образом, расхождение теории и эксперимента не превышало 6%.

Заключение

Разработана модель расчета компонентного состава многокомпонентного покрытия, позволяющая определять технологические параметры процесса его формирования.

Литература

1. Физика тонких пленок: Т.3 / Под ред. Г. Хасса, Р.Э. Тула/ – М.: Мир, 1968. – 332 с.

2. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Вып. 2: Распыление сплавов и соединений, распыление под действием электронов и нейтронов, рельеф поверхности / Под ред. Р. Бериша. – М.: Мир, 1986. – 488 с.

3. Иващенко С.С., Колесник В.В., Колесник В.П. Нанесение многокомпонентных покрытий в квазимагнетронной установке // *Авиационно-космическая техника и технология*. Труды ХАИ им. Н.Е. Жуковского. – Х.: ХАИ. – 1998. – С. 287 – 290.

4. Формирование многослойных многокомпонентных защитных покрытий / Н.В. Белан, В.В. Колесник, С.С. Иващенко и др. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – № 7 (15). – С. 231 – 235.

5. Колесник В.В., Падалка В.Г., Лунев И.В. Исследование процессов генерирования ионных потоков в ионном магнетроне // *Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научн. трудов.* – Х.: Гос. аэрокосмический ун-т «ХАИ». – 1999. – Вып. 12. – С. 58 – 61.

6. Формирование жаростойких покрытий типа $Me-Cr-Al-Y$ / В.В. Колесник, Н.В. Белан, С.С. Иващенко, В.П. Колесник // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. научн. трудов.* – Х. – 2002. – Вып. 30 (3). – С. 175.

Поступила в редакцию 5.05.2005

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. А.К. Гнап, Национальный аграрный университет, Харьков.