

УДК 621.793.74

**В.П. КОЛЕСНИК<sup>1</sup>, Д.В. СЛЮСАРЬ<sup>1</sup>, А.Н. ПРОКОПЕНКО<sup>2</sup>, В.В. ЗИНОВЬЕВ<sup>1</sup>,  
В.Ф. ГАЙДУКОВ<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

<sup>2</sup>ОАО «Мотор Сич», Украина

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА СКОРОСТИ НАНЕСЕНИЯ И РАВНОМЕРНОСТИ ЖАРСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ В МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКЕ МАП-1

Показана перспективность использования установки МАП-1 в магнетронном режиме работы для нанесения жаростойких покрытий на лопатки турбин газотурбинных двигателей. Предложена методика расчета скорости нанесения и равномерности жаростойких покрытий при помощи модернизированной установки МАП-1. Намечены пути ее дальнейшей модернизации для увеличения производительности и качества наносимых покрытий.

**жаростойкие покрытия, формирование покрытий, магнетронная распылительная система, ионно-плазменное технологическое оборудование, катодное распыление**

### Введение

К лопаткам турбин газотурбинных двигателей четвертого поколения предъявляются более высокие требования, нежели к тем, что производятся сейчас. Однако с применением существующих ныне технологий изготовления лопаток газовых турбин добиться существенного улучшения их функциональных характеристик очень сложно. Таким образом, существует необходимость в разработке новых технологий их изготовления. В частности это касается и технологии нанесения жаростойких покрытий, так как лопатки турбин авиационных двигателей четвертого поколения будут работать при существенно более высоких температурах.

### 1. Формулирование проблемы

В настоящее время на предприятиях стран СНГ по производству авиационных двигателей, таких, например, как ОАО «Мотор-Сичь», ОАО «Рыбинские моторы», для нанесения жаростойких покрытий применяется установка МАП-1 [1, 2]. Обладая достаточно хорошими рабочими характеристиками, такими как высокая скорость осаждения покрытия, сохранение стехиометрического состава наносимого покрытия при его переносе с катода-мишени на

подложки, она имеет и целый ряд недостатков. Одним из таких недостатков является наличие микрокапельной фазы в потоке материала покрытия, проходящего на подложку. Это приводит к существенному ухудшению качества получаемых жаростойких покрытий: высокой шероховатости (рис. 1), ухудшению адгезии (рис. 2), появлению трещин и сквозных пор. Всё это недопустимо при производстве авиационных двигателей четвертого поколения.

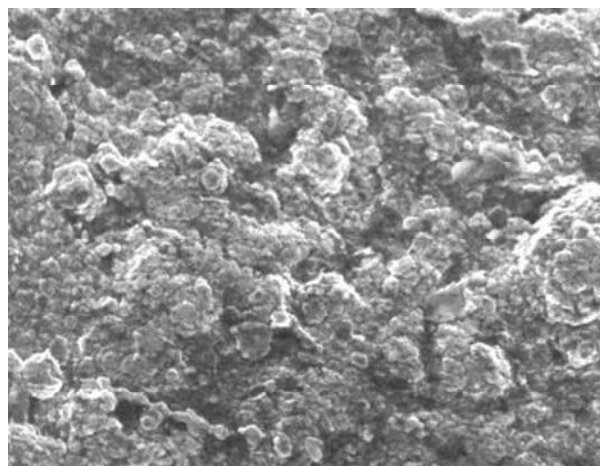
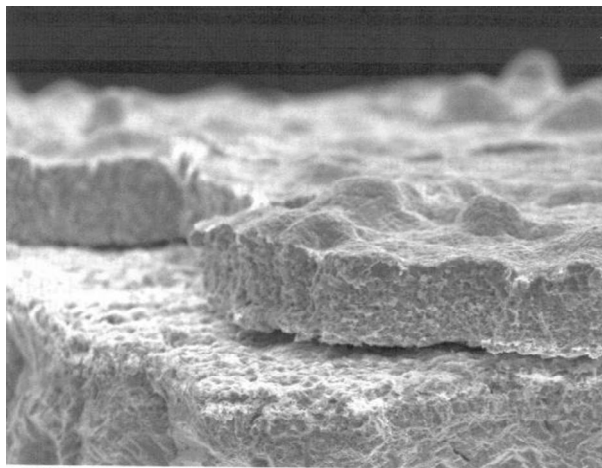


Рис. 1. Микрофотография поверхности детали с жаростойким покрытием СДП-2, нанесенным при помощи установки МАП-1, работающей в дуговом режиме

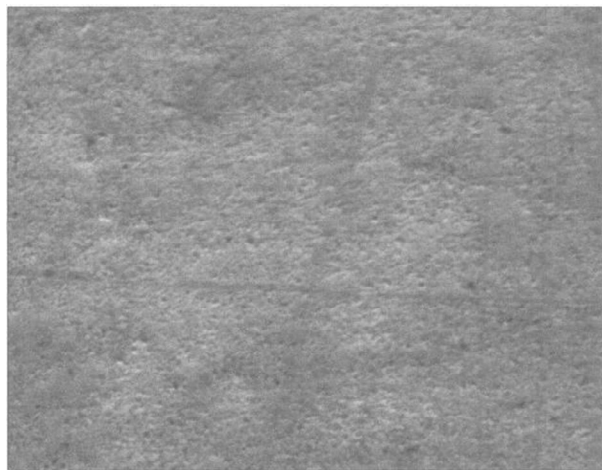
Как показали ранее проведенные исследования, перевод установки МАП-1 из дугового режима ра-

боты в магнетронный позволяет решить данные проблемы (рис. 3, 4) [3]. В то же время это не приводит к необходимости внесения существенных изменений в конструкцию установки, что удешевляет переход на новый технологический процесс осаждения жаростойких покрытий.



×500

Рис. 2. Микрофотография излома лопатки с жаростойким покрытием СДП-2, нанесенным при помощи установки МАП-1, работающей в дуговом режиме

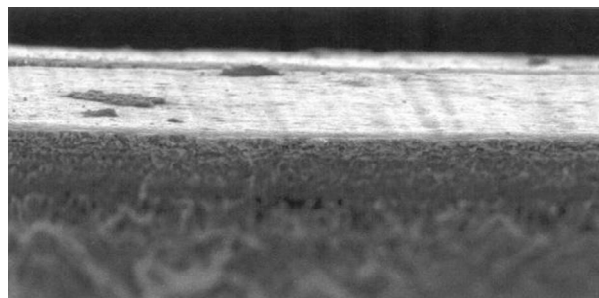


Lab1  
10000x kV:25 Tilt:0  
2μm

Рис. 3. Микрофотография поверхности детали с жаростойким покрытием СДП-2, нанесенным при помощи установки МАП-1, работающей в магнетронном режиме

Однако при этом возникает необходимость в разработке методов проектирования технологических процессов нанесения жаростойких покрытий с использованием установки МАП-1, работающей в

магнетронном режиме. В первую очередь нужно обратить внимание на разработку математической модели процесса переноса материала покрытия с катода-мишени на подложки, которую в последствии можно было бы применить при проектировании технологического процесса.



×750

Рис. 4. Микрофотография излома детали с жаростойким покрытием СДП-2, нанесенным при помощи установки МАП-1, работающей в магнетронном режиме

## 2. Решение проблемы

Распределение материала, распыленного с поверхности катода-мишени, по поверхности обрабатываемой детали зависит от следующих факторов [4, 7]:

- степени однородности распыления мишени;
- количества соударений, которые испытывают атомы распыленного материала с атомами плазмообразующего газа;
- величины коэффициента конденсации;
- влияния электрического и магнитного полей на траекторию ионизированных атомов распыленного материала;
- степени обратного распыления осажденной пленки.

Учесть все вышеперечисленные факторы при разработке модели процесса переноса материала с катода-мишени на подложку сложно. Поэтому приходится не учитывать те из них, которые незначительно влияют на процесс нанесения покрытия.

Так как доля ионизированных атомов в потоке распыленного вещества, который приходит на под-

ложку, не превышает 2...3% [5], то влиянием электрических и магнитных полей на процесс переноса вещества покрытия с катода-мишени на деталь можно пренебречь. Энергия распыленных атомов металлов при использовании в качестве плазмообразующего газа Ag при давлении  $\sim 0,16$  Па и напряжении разряда 500 – 800 В для цилиндрической МРС не превышает 100 Эв [4]. При такой энергии частиц процесс обратного распыления практически не происходит. Следовательно, при проведении расчета профиля толщины многокомпонентного жаростойкого покрытия типа Me-Co-Ni-Al-Y им также можно пренебречь. При давлении плазмообразующего газа в технологическом отсеке  $\sim 0,1$  Па можно предположить, что атомы распыляемого материала незначительно рассеиваются в результате столкновений в газе. Следовательно, можно считать, что атомы распыленного вещества от катода-мишени до подложки перемещаются по прямой.

Как правило, при проведении расчетов толщины пленки считают, что распыление катода-мишени в рабочей зоне происходит равномерно. В действительности в цилиндрической МРС периферийные участки рабочей зоны катода-мишени распыляются менее интенсивно. Для учета этого явления можно выделять на поверхности катода мишени несколько областей и рассматривать их как отдельные источники с различной скоростью эмиссии, как это предложено в [4]. Для более точного учета неравномерности выработки материала катода-мишени при расчете толщины покрытия при использовании конусообразного катода-мишени была применена аппроксимация скорости распыления полиномом Лагранжа [6]. Однако для цилиндрической МРС скорость распыления катода-мишени можно аппроксимировать следующей функцией:

$$V_p(z) = V_{p \max} \cdot e^{-z^2/G}, \quad (1)$$

где  $V_{p \max}$  – максимальная скорость распыления;  $G$  – константа.

Скорость распыления определялась путем пря-

мого замера профиля катода-мишени до и после определенного периода работы при постоянных параметрах разряда (рис. 5).

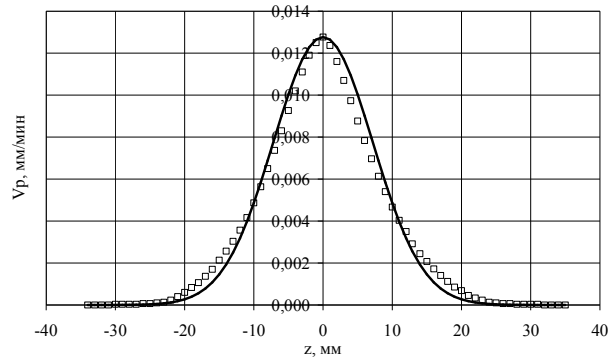


Рис. 5. Профиль выработки катода-мишени:  
□ – экспериментальные данные,  
— кривая, полученная в результате аппроксимации

При проведении расчетов профиля толщины пленки были сделаны следующие предположения:

- распыление материала катода-мишени происходит в соответствии с выражением (1);
- эмиссия подчиняется закону косинусного распределения;
- атомы распыляемого материала незначительно рассеиваются в результате столкновений в газе;
- атом материала осаждается в месте соударения с подложкой;
- плотность полученной пленки такая же, как у материала катода-мишени.

В результате была получена формула для расчета скорости нанесения покрытия в произвольной точке  $A$ , расположенной на расстоянии  $R$  от оси цилиндрического катода-мишени в зависимости от координаты  $z$  (рис. 6):

$$V = K_k \cdot \frac{r}{R} \cdot \sum_{i=1}^n \int_{z_1}^{z_2} \frac{V_{p \max i} \cdot e^{-\frac{(z-l_i)^2}{G_i}}}{2} \times \frac{(R-r)}{((R-r)^2 + (z-z_p)^2)^{3/2}} dz, \quad (2)$$

где  $r$  – радиус катода-мишени;  $K_k$  – коэффициент конденсации;  $n$  – количество зон распыления;  $z_1$  и  $z_2$  –

соответственно координаты начала и конца  $i$ -й рабочей зоны катода-мишени;  $l_i$  – расстояние между центром  $i$ -й зоны распыления и началом координат;  $V_{p \max i}$  – максимальная скорость распыления в  $i$ -й зоне.

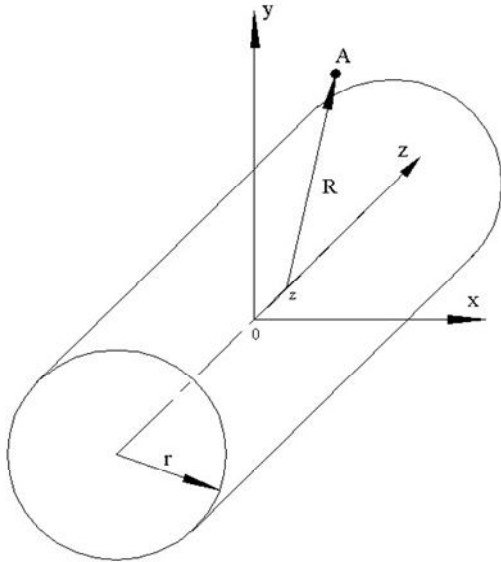


Рис. 6. Нанесение покрытия в произвольной точке  $A$

Используя формулу (2), можно достаточно эффективно провести оптимизацию процесса нанесения функциональных покрытий при помощи установки МАП-1, а также других технологических установок, построенных на основе цилиндрических магнетронных распылительных систем.

Так, например, в серийно выпускаемой установке МАП-1 применена дуговая система с одной зоной распыления. В случае использования данной установки в магнетронном режиме работы со стандартным катодом-мишенью диаметром  $D = 170$  мм возможно достижение скорости нанесения покрытия только  $\sim 0,1$  мкм/мин. Это связано с тем, что в конструкции катодного узла применено косвенное охлаждение катода-мишени, что при дальнейшем увеличении тока разряда может привести к его перегреву. Однако, при использовании двух зон распыления (рис. 7) становится возможным увеличить скорость нанесения покрытия до  $\sim 0,2$  мкм/мин. Кроме того, изменяя расстояние  $l$  между зонами распыления

можно регулировать равномерность нанесения покрытия (рис. 8).

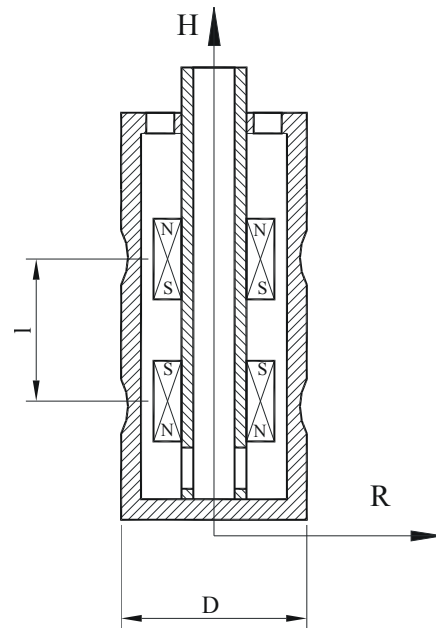


Рис. 7. Использование двух зон распыления

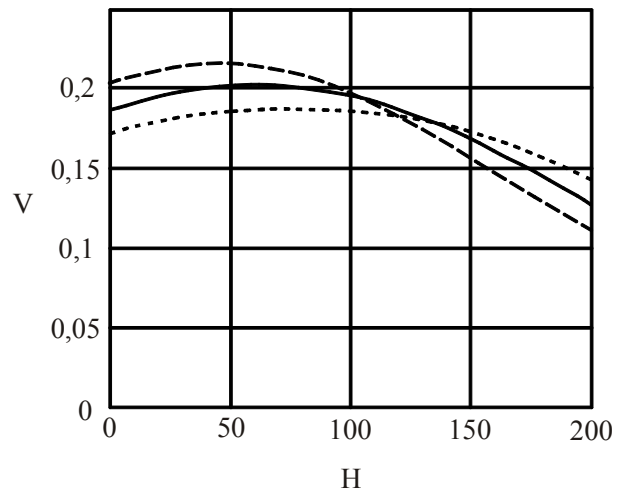


Рис. 8. Зависимость скорости нанесения покрытия по высоте обрабатываемой детали:  
 - - - - при  $l = 90$  мм;  
 — при  $l = 120$  мм;  
 ..... при  $l = 150$  мм.

Тем не менее, даже скорость нанесения покрытия  $\sim 0,2$  мкм/мин является на сегодняшний день недостаточной.

Как показали расчеты ее можно существенно увеличить простым увеличением диаметра катода-мишени (рис. 9).

## Заключение

Предложена методика расчета скорости нанесения покрытия при помощи установки МАП-1, переведенной из дугового режима работы в магнетронный.

На основании разработанной методики были намечены пути дальнейшей модернизации установки МАП-1, что позволит повысить, как ее производительность, так и качество наносимых покрытий. Показано, что изменяя количество зон распыления и расстояние между ними, можно управлять равномерностью нанесения покрытия по высоте обрабатываемых деталей.

Также на основании проведенных расчетов был сделан вывод о целесообразности увеличения диаметра катода-мишени для достижения более высоких скоростей нанесения покрытий.

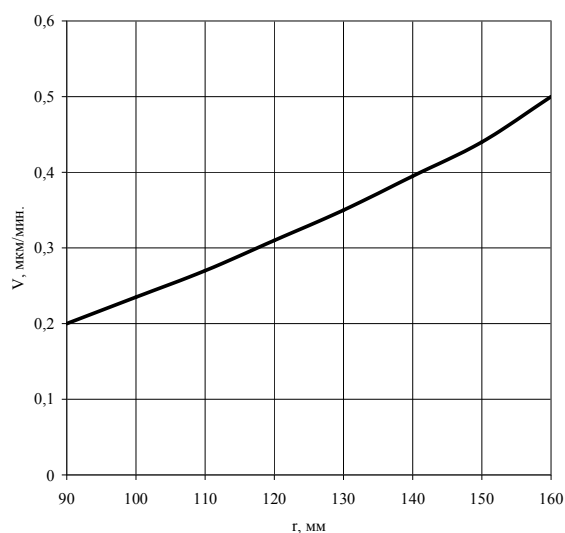


Рис. 9. Зависимость скорости нанесения покрытия от диаметра катода-мишени

Применение данной методики расчета скорости нанесения покрытия даст возможность существенно удешевить стоимость разработки новых технологических процессов нанесения функциональных покрытий, благодаря тому, что при его разработке отпадет необходимость в проведении большого количества дорогостоящих экспериментов.

## Литература

1. Пат. 2164549 Российская федерация, МКИ С 23 С 14/30. Способ испарения и конденсации токопроводящих материалов. Каблов Е.Н., Мубождян С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А.; заявитель и патентообладатель Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов – № 99111127/02 ; заявл. 1999.05.27 ; опубл. 27.03.01, Бюл. №7 (Ич.) – 3 с.
2. Лесневский Л.Н., Тюрин В.Н., Ягодкин Ю.Д. Технология плазменных покрытий в производстве энергетических и двигательных установок: Уч. пособие. – М.: Изд-во МАИ, 1994. – 69 с.
3. Исследование магнетронного режима работы установки МАП-1 / В.П. Колесник, Д.В. Слюсарь, А.Н. Прокопенко, Н.В. Белан, В.А. Федотенко // Вестник двигателестроения: Науч.-техн. журн. – 2005. – № 2. – С. 178-181.
4. Данилин Б.С., Киреев Ю.В. Получение пленок равномерной толщины при ионном распылении // Зарубежная электронная техника. – 1972. – Вып. 23. – С. 36-55.
5. Thornton J., Lamb J. Substrate heating rates for planar and cylindrical post magnetron sputtering sources// Thin Solid Films. – 1984. – Vol. 119, № 1. – P. 87-95.
6. Данилин Б.С., Сырчин В.К., Тимофеев П.А. Исследование равномерности нанесения тонкопленочных слоев в магнетронных системах ионного распыления материалов. // Электронная техника, Серия 3. – 1978. – Вып. 1 (73). - С. 26-32.
7. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 328 с.

Поступила в редакцию 25.04.2007

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