

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ МИКРОПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ $TiO_2$ НА СТЕПЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАПЫЛЯЕМОГО МАТЕРИАЛА

Ю. С. БОРИСОВ, С. Г. ВОЙНАРОВИЧ, А. Н. КИСЛИЦА, С. Н. КАЛЮЖНЫЙ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В работе проведено исследование степени влияния технологических параметров микроплазменного напыления на коэффициент использования материала в процессе формирования резистивного покрытия из диоксида титана. Исследования проводились с применением многофакторного эксперимента с дробными репликами  $2^{4-1}$ . В результате обработки экспериментальных данных было получено уравнение регрессии, которое позволяет оценить степень влияния параметров микроплазменного напыления, таких как ток, дистанция напыления, расход плазмообразующего газа и порошка на величину коэффициента использования материала. Установлено, что наиболее весомое влияние на него оказывает значение тока. В процессе исследования показано, что подбор параметров режима микроплазменного напыления резистивных дорожек из порошка  $TiO_2$  позволит минимизировать потери материала. Библиогр. 4, табл. 2.

*Ключевые слова:* микроплазменное напыление,  $TiO_2$ , коэффициент использования материала, резистивный нагревательный элемент

В процессе изготовления плоских низкотемпературных резистивных нагревательных элементов (РНЭ) все более широкое применение находят технологии газотермического напыления (ГТН) [1, 2]. Такие РНЭ представляют собой многослойные термостойкие покрытия, состоящие из изоляционного и проводящего слоя, которые могут формироваться непосредственно на нагреваемой металлической поверхности. РНЭ данного вида обладают преимуществом сниженной температуры в проводящем слое, позволяющей повысить их электробезопасность, а также экономичностью и увеличенным сроком службы [3].

Однако в процессе получения малоразмерных РНЭ методами ГТН возникают потери напыляемого материала, которые состоят из потерь на разбрызгивание, отскок напыляемых частиц, а также из-за геометрического фактора. Потери, связанные с геометрическим фактором при традиционном плазменно-дуговом напылении, обусловлены размером диаметра пятна напыления 20...25 мм, который в несколько раз превышает ширину резистивной дорожки 3...5 мм. Потери материала на разбрызгивание и отскок возможно охарактеризовать коэффициентом использования материала (КИМ). Данный параметр не только показывает экономичность процесса, но и используется как параметр оптимизации.

Повышение степени использования напыляемого материала в условиях нанесения резистивных дорожек может быть достигнуто путем применения технологии микроплазменного напыления (МПН) благодаря небольшому диаметру пятна напыления

(3...5 мм). Кроме того, данная технология оказывает минимальное термическое влияние на подложку, что обеспечивает получение покрытия на тонкостенных деталях без их деформации [4].

Цель данной работы заключалась в определении потерь напыляемого материала на разбрызгивание и отскок, а также исследовании степени влияния на КИМ основных параметров процесса МПН, таких как ток  $I$ , А, дистанция напыления  $H$ , мм, расход плазмообразующего газа  $G_{пл}$ , л/мин и порошка  $P_{пор}$ , г/мин.

Исследования проводились с применением метода математического планирования (многофакторный эксперимент с дробными репликами  $2^{4-1}$ ). Интервалы варьирования значения параметров процесса микроплазменного нанесения и результаты эксперимента по определению КИМ при микроплазменном напылении порошка  $TiO_2$  на пластину приведены в табл. 1, 2.

Для определения КИМ использовались плоские образцы из стали марки Ст.3 диаметром 20 мм и толщиной 1 мм. Перед напылением на аналитических весах ВЛР-200 с точностью до  $10^{-5}$  г определялась масса образца без покрытия. Затем в течение 15 с проводили напыление покрытия на установке микроплазменного напыления МПН-004 при неподвижном положении плазмотрона порошком  $TiO_2$  фирмы «Metachim» с размером частиц порошка 15...40 мкм, на режимах согласно плану эксперимента с применением метода математического планирования.

Массу покрытия  $m_{покр}$  рассчитывали как разницу масс образца после напыления и до напыления.

Таблица 1. Интервалы варьирования параметров процесса МПН

Уровни варьирования	Факторы			
	I, А	G <sub>пл</sub> , л/мин	H, мм	P <sub>пор</sub> , г/мин
Верхний уровень +	45	2	160	1,8
Нижний уровень -	35	1	80	0,6
Основной уровень 0	40	1,5	120	0,8
Интервалы варьирования	5	0,5	40	0,4

Расход порошка  $m_{пор}$  определяли перед каждым экспериментом взвешиванием количества порошка, подаваемого дозатором за 15 с.

Коэффициент использования материала находили по формуле

$$КИМ = \frac{m_{покр}}{m_{пор}} \cdot 100\%.$$

В результате математической обработки полученных данных эксперимента, приведенных в табл. 2, было рассчитано уравнение регрессии для КИМ, которое имеет следующий вид:

$$КИМ = 15,75 + 1,45I + 0,35G_{пл} - 0,39375H + 7,5P_{пор}.$$

Сравнение экспериментальных результатов, полученных при использовании уравнения регрессии, с расчетными показывает их хорошую сходимость, что свидетельствует об адекватности использованной модели (см. табл. 2). Полученное уравнение регрессии позволяет оценить влияние каждого параметра МПН на величину КИМ. В случае увеличения тока КИМ повышается за счет возрастания температуры плазменной струи и более высокого тепловложения в нагрев частиц порошка. Данный технологический параметр при МПН оказывает наибольшее влияние на КИМ.

С повышением расхода газа происходит снижение КИМ. Это объясняется тем, что при увеличении расхода газа не только снижается температура плазменной струи, но и возрастает ее скорость. Увеличение скорости истечения плазменной струи вызывает увеличение скорости частиц напыляемого материала, что в свою очередь, сокращает время их пребывания в высокотемпературной зоне плазменной струи и ведет к снижению степени их нагрева.

При увеличении дистанции напыления наблюдается снижение КИМ, что связано с частичным остыванием напыляемых частиц и переходом их в твердое состояние при подлете к основе.

Из данных значения КИМ, приведенных в табл. 2, следует, что при микроплазменном напылении резистивного материала TiO<sub>2</sub> максимальная степень полезного использования напыляемого материала достигается на режиме № 2 и составляет 89 %. На данном режиме МПН энтальпия плазменной струи достигает 6,6 кВт·ч/м<sup>3</sup>, что позволя-

Таблица 2. Значения параметров МПН и результаты эксперимента по определению КИМ

Номер режима	I, А	G <sub>пл</sub> , л/ч	H, мм	P <sub>пор</sub> , г/мин	КИМ, %	
					Экспериментальный	Расчетный
1	45	120	160	1.8	75	74
2	45	120	80	0.6	89	96
3	45	60	160	0.6	44	44
4	45	60	80	1.8	78	84
5	35	120	160	0.6	47	50
6	35	120	80	1.8	88	91
7	35	60	160	1.8	28	38
8	35	60	80	0.6	65	61
9	40	90	120	0,8	68	64

ет разогреть частицы до температуры плавления и при минимальном значении дистанции напыления 80 мм обеспечить взаимодействие частиц с подложкою в расплавленном состоянии.

### Выводы

1. Проведена оценка влияния параметров МПН, таких как ток, расход плазмообразующего газа, дистанция напыления, расход порошка на коэффициент использования материала в процессе напыления покрытия из TiO<sub>2</sub>. Установлено, что наиболее весомое влияние на коэффициент использования материала при МПН оказывает ток, с увеличением значения данного параметра возрастает температура плазменной струи, что способствует большему тепловложению в нагрев частиц порошка.

2. Установлено, что при микроплазменном напылении резистивного материала TiO<sub>2</sub> максимальная степень полезного использования напыляемого материала составляет 89 %, при энтальпии плазменной струи 6,6 кВт·ч/м<sup>3</sup>, что позволяет разогреть частицы до температуры плавления и обеспечить взаимодействие частиц с подложкой в расплавленном состоянии при минимальном значении дистанции напыления 80 мм.

1. Создание низкотемпературного нагревателя методом плазменного напыления / А. С. Аньшаков, А. М. Казанов, Э. К. Урбах [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1998. – № 3. – С. 56–61.
2. Пат. 2066514 РФ Н 05 В 3/12. Способ изготовления резистивного нагревательного элемента / Д. И. Бакланов, И. Н. Беляйков, А. М. Вирник [и др.]; заяв. патентообл. Научно-исследовательский центр прикладных проблем электродинамики Объединенного института высоких температур РАН; заявл. 14.09.1993. – Опубл. 10.09.1996 г.
3. Плазменное нанесение резистивных слоев ленточного электронагревателя / А. А. Ершов, Э. К. Урбах, В. А. Фалеев [и др.] // Физика низкотемпературной плазмы: Материалы конференции. – Петрозаводск: ПГУ, 1995 – Ч. 3. С. 409–411.
4. Изготовление резистивного электронагревателя способом микроплазменного напыления / Ю. С. Борисов, С. Г. Войнарович, А. Н. Кислица [и др.] // Автоматическая сварка. – 2013. – № 9. – С. 52–53.

Поступила в редакцию 06.06.2016