



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЯТНА НАПЫЛЕНИЯ И ФИГУРЫ МЕТАЛЛИЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ МИКРОПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЯ ИЗ ДИОКСИДА ТИТАНА

**Ю. С. БОРИСОВ, С. Г. ВОЙНАРОВИЧ, А. Н. КИСЛИЦА, С. Н. КАЛЮЖНЫЙ**  
 ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведен анализ накопленного опыта по применению газотермических технологий в производстве электропроводных, диэлектрических и резистивных покрытий для машиностроения, электротехники, приборостроения и других областей промышленности. Показано, что наиболее перспективным для формирования резистивных покрытий при изготовлении нагревательных элементов является способ плазменно-дугового напыления. Установлено, что в процессе изготовления резистивных нагревательных элементов (РНЭ) малых размеров (например, для радиоэлектроники) способом традиционного плазменно-дугового напыления увеличиваются потери напыляемого материала, связанные с геометрическим фактором. В связи с этим, с целью повышения степени использования напыляемых материалов перспективным является применение технологии микроплазменного напыления. Цель работы направлена на исследование формирования пятна напыления и фигуры металлизации в условиях микроплазменного напыления покрытия из диоксида титана. В процессе исследования было установлено, что пятно напыления из порошка  $TiO_2$  имеет форму эллипса с размером осей 6...9,2 мм, где меньшая ось направлена по горизонтали, а большая по вертикали. Соотношение осей составляет 1,01...1,47 и зависит от параметров режима напыления. Определены потери напыляемого материала, связанные с геометрическим фактором, которые составили 53 % при напылении дорожки шириной 1 мм и меньше 1 % при напылении дорожки 5 мм. Библиогр. 19, табл. 1, рис. 5.

*Ключевые слова:* микроплазменное напыление, диоксид титана, резистивный нагревательный элемент, фигура металлизации

На сегодняшний день накоплен большой опыт в изготовлении способами газотермического напыления (ГТН) различного рода покрытий таких, как электропроводные, диэлектрические и резистивные, предназначенных для различных отраслей промышленности (машиностроения, электротехники, приборостроения и др.) [1–3].

Большой практический интерес представляют резистивные покрытия, изготовленные способами ГТН. Анализ литературных источников о проводимых исследованиях по применению способов ГТН для формирования резистивных покрытий в электротехнике неоднократно подтверждает перспективность данных технологий [4, 5]. С развитием и усовершенствованием технологии ГТН в последнее время в производстве резистивных покрытий все более широкое применение находит способ плазменно-дугового напыления [6–9]. В частности, данный способ хорошо себя зарекомендовал при изготовлении резистивных нагревательных элементов (РНЭ) [10–12]. Изготовленные способом плазменно-дугового напыления РНЭ характеризуются существенным уменьшением температуры в токонесущих слоях и увеличенным сроком службы [13–15]. Однако в процессе изготовления РНЭ малых размеров для радиоэлектроники способом традиционного плазменно-ду-

гового напыления возникают дополнительные затраты, вызванные увеличением потерь напыляемого материала, которые характеризуются как потери, связанные с геометрическим фактором. Эти потери обусловлены тем, что диаметр пятна напыления для традиционного плазменно-дугового напыления составляет 20...25 мм, что превышает ширину дорожки (2...5 мм) РНЭ. С целью повышения степени использования напыляемого материала целесообразно применить технологию микроплазменного напыления (МПН) [16, 17]. Данная технология позволит наносить покрытия из разного рода материалов, значительно сократит потери напыляемого материала благодаря небольшому диаметру пятна напыления (3...5 мм), оказывая при этом минимальное термическое влияние на подложку, что позволит получать покрытия на тонкостенных деталях без их коробления.

В работе проведено исследование формирования пятна напыления и фигуры металлизации в условиях микроплазменного нанесения покрытия из диоксида титана, определены потери напыляемого материала, связанные с геометрическим фактором в зависимости от ширины напыляемой дорожки.

Для анализа потерь материала, связанных с геометрическим фактором, был проведен ряд экс-

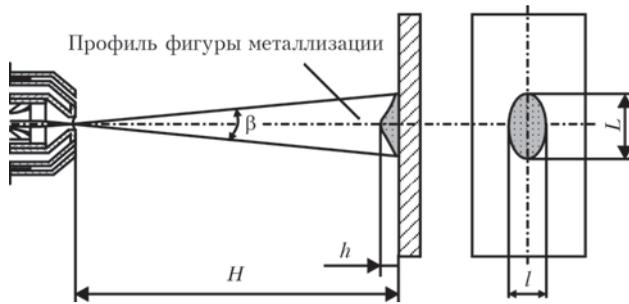


Рис. 1. Схема исследования фигуры металлизации

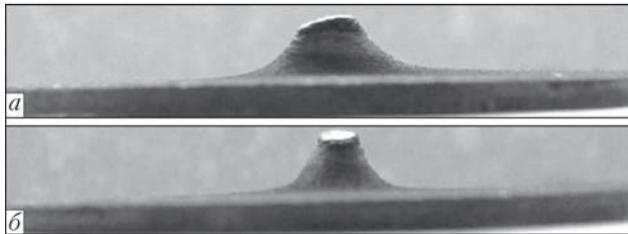


Рис. 2. Профили фигуры металлизации из материала  $TiO_2$ : а — большая ось; б — меньшая

периментов по определению параметров фигуры металлизации, которая описывает распределение массы материала покрытия в пятне напыления. Фигуры металлизации получали в процессе напыления при неподвижном плазмотроне в точку на плоские образцы размером 20 мм в течение 10 с, а затем проводили измерения вертикальной (большой)  $L$  и горизонтальной (малой)  $l$  осей пятна напыления, а также максимальной высоты напыленной горки  $h$  (рис. 1).

При помощи цифрового фотоаппарата проводили макросъемку профилей фигуры металлизации в направлениях, перпендикулярных ее осям (рис. 2).

После этого была проведена обработка изображения по определению координат профиля фигуры. По этим координатам с помощью программы MathCad строилась фигура металлизации и определялась описывающая ее функция, по которой рассчитывалась площадь фигуры для большей и меньшей осей. Имея данные о размерах фигуры

Параметры фигуры металлизации в зависимости от режимов напыления  $TiO_2$

| № режима | $I, A$ | $G_{пл}, л/мин$ | $H, мм$ | $P_{расх. пор}, г/мин$ | Высота фигуры металлизации, мм | Большая ось, мм | Меньшая ось, мм |
|----------|--------|-----------------|---------|------------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------|
| 1        | 45     | 120             | 200     | 1,8                    | 2,21                           | 9,2             | 7,5             |
| 2        | 45     | 120             | 100     | 0,6                    | 1,04                           | 6,3             | 4,7             |
| 3        | 45     | 60              | 200     | 0,6                    | 0,53                           | 8,2             | 7,4             |
| 4        | 45     | 60              | 100     | 1,8                    | 2,31                           | 7,2             | 5,6             |
| 5        | 35     | 20              | 200     | 0,6                    | 0,35                           | 8,8             | 6,2             |
| 6        | 35     | 120             | 100     | 1,8                    | 2,27                           | 8,6             | 6,6             |
| 7        | 35     | 60              | 200     | 1,8                    | 0,81                           | 7,2             | 7               |
| 8        | 35     | 60              | 100     | 0,6                    | 1,34                           | 7,6             | 5,4             |

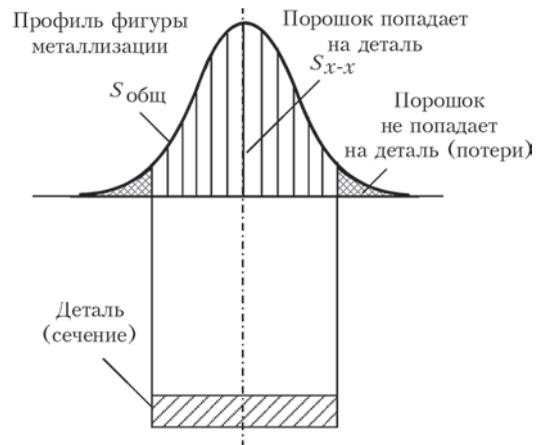


Рис. 3. Потери материала из-за геометрического фактора металлизации, можно определить такой параметр, как угол раскрытия плазменной струи:

$$\beta = 0,5 \arctg \frac{L}{2H}, \quad (1)$$

где  $L$  — ширина валика;  $H$  — дистанция напыления.

Потери материала, связанные с геометрическим фактором, определялись как:

$$П_{г.ф} = (1 - S_{x-x}/S_{общ})100, \%, \quad (2)$$

где  $S_{общ}$  — общая площадь фигуры металлизации (рис. 3);  $S_{x-x}$  — площадь фигуры металлизации, ограниченная размером детали.

Напыление проводили на установке микроплазменного напыления МПН-004. В качестве материала для напыления был использован порошок диоксида титана ( $TiO_2$ ) фирмы «Metachim» с размером частиц порошка 15...40 мкм.

Интервалы варьирования, значения исследуемых режимных параметров и результаты эксперимента по измерению геометрических размеров пятна напыления приведены в таблице.

В процессе исследования было установлено, что пятно напыления из порошка  $TiO_2$  имеет форму эллипса с размером осей 6...9,2 мм, где меньшая ось направлена по горизонтали, а большая по вертикали. Соотношение осей составляет 1,01...1,47 и зависит от параметров режима напыления. Вероятно, такая форма пятна напыления вызвана тем, что при подаче порошка с использованием дозатора МД-004 на его частицы действует сила тяжести, направленная перпендикулярно оси струи. Так как частицы порошка отличаются размером, следовательно, массой и аэродинамическим сопротивлением, под воздействием силы тяжести они будут проникать в струю на разную глубину. При таких условиях получаемое пятно напыления будет иметь форму эллипса, большая ось которого расположена в вертикальной плоскости, т. е. совпадает с

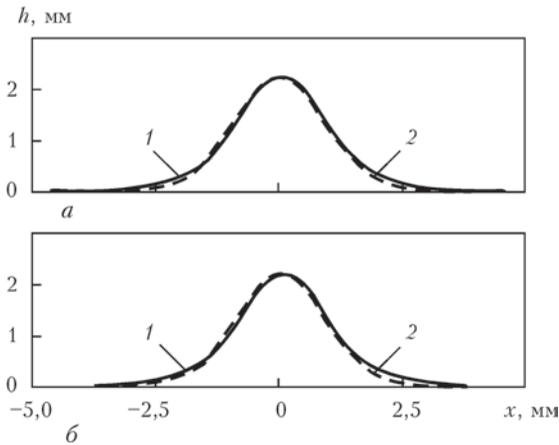


Рис. 4. Поперечное сечение фигур металлизации по осям пятна напыления: *a* — сечение по большей оси  $y = 2,21 \cdot e^{-0,56x^2}$ ; *б* — сечение по меньшей оси  $y = 2,21 \cdot e^{-0,6x^2}$ ; 1 — график распределения Гаусса (расчетный); 2 — фактический профиль фигуры металлизации направлением действия силы тяжести (см. рис. 1). Анализ характера кривых показал, что геометрия фигуры металлизации при МПН достаточно надежно описывается функцией Гаусса [18]

$$y = y_0 e^{-kx^2}, \quad (3)$$

где  $y_0$  — толщина покрытия на оси валика;  $x$  — расстояние от оси валика;  $k$  — коэффициент сосредоточенности материала покрытия в пятне напыления.

С использованием экспериментальных данных, полученных в результате измерения профиля фигур металлизации (измерения проводили по большей  $L$  и меньшей  $l$  осям — см. рис. 1), были построены совпадающие с ними кривые Гаусса для различных режимов напыления (рис. 4). Коэффициент корреляции  $K$  составил 0,9849... 0,9992. Значение  $k$  изменялось в диапазоне 0,12...0,97.

В результате проведенных расчетов согласно формуле (1) установлено, что угол раскрытия микроплазменной струи находится в пределах 2...5,2°. Полученные результаты соответствуют значениям, приводимым в литературе для ламинарных плазменных струй [19].

Проведенные для каждого опыта расчеты потерь напыляемого материала, связанные с геометрическим фактором, в зависимости от размера резистивной дорожки, приведены в виде гистограммы (рис. 5).

Анализ гистограммы позволил установить, что наименьшие потери обеспечиваются при использовании режима № 6 (см. таблицу). Данный режим характеризуется минимальным значением силы тока и высоким расходом плазмообразующего газа, что снижает температуру плазменной струи и тем самым позволяет сократить дистанцию напыления до подложки без риска ее пере-

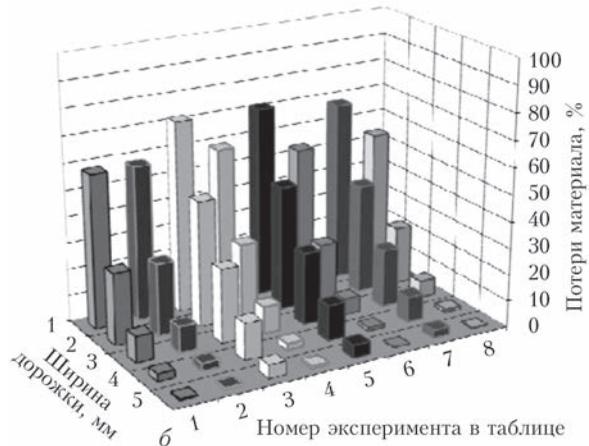
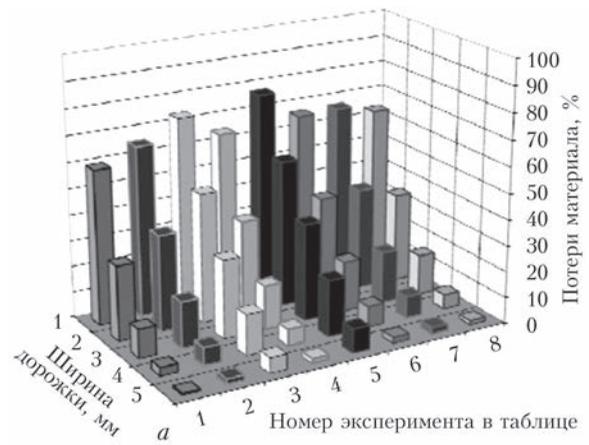


Рис. 5. Потери напыляемого материала, связанные с геометрическим фактором, в зависимости от размера резистивной дорожки: *a* — для большей диагонали; *б* — для меньшей диагонали

грева. Сокращение дистанции в свою очередь приводит к уменьшению пятна напыления. Потери при этом составили 53 % при напылении дорожки шириной 1 мм и меньше 1 % при напылении дорожки 5 мм.

### Выводы

1. В результате исследования процесса формирования покрытия из диоксида титана в условиях микроплазменного напыления установлено, что геометрические размеры пятна напыления зависят от параметров процесса напыления. Пятно напыления имеет форму эллипса с размером осей 6...9,2 мм при соотношении осей 1,01...1,47, а фигура металлизации описывается распределением Гаусса.

2. Показано, что подбором режимов микроплазменного напыления резистивных дорожек из материала  $TiO_2$  возможно управлять потерями материала, связанными с геометрическим фактором. Минимальные потери достигаются при условии работы плазмотрона на режиме № 6, который характеризуется минимальным значением силы тока и высоким расходом плазмообразующего газа, что снижает температуру плазменной струи и тем са-



мим позволяет сократить дистанцию напыления до подложки без риска ее перегрева с уменьшенным пятном напыления. Это позволяет получать минимальные потери напыляемого материала дорожки шириной от 1 до 5 мм, которые составляют 53 % при напылении дорожки шириной в 1 мм и меньше 1 % при напылении дорожки шириной в 5 мм.

1. *Вашкевич Ф. Ф., Спальник А. Я., Плужко И. А.* Электротермоизоляция индукторов для внутреннего нагрева трубных заготовок // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск, ПАСА, 2009. – С. 4–6.
2. *Борисов Ю. С., Кислица А. Н.* Микроплазменное напыление с использованием проволочных материалов // Автомат. сварка. – 2002. – № 3. – С. 54–55.
3. *Коваленко Г. Д., Зомбжицкий А. П.* Особенности плазменного напыления электронагревательных покрытий с диэлектрическим наполнителем // Физика и химия обработки материалов. – 1980. – № 4. – С. 86–89.
4. *Лясников В. Н., Перов В. В., Лаврова В. Н.* Применение плазменно-дугового напыления алунда при изготовлении катодно-подогревательного узла // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1977. – Вып. 4. – С. 85–87.
5. *Пат. 2066514 РФ МКИ Н 05 В 3/12.* Способ изготовления резистивного нагревательного элемента / Д. И. Бакианов, И. Н. Беляйков, А. М. Вирник и др. – Опубл. 10.09.96.
6. *Scheitz S., Toma L., Berger L.-M. et al.* Thermisch gespritzte keramische Schichtheizelemente // Thermal spray bulletin. – 2011. – 4. – S. 88–92.
7. *Лясников В. К., Богатырев Г. Ф.* Плазменное напыление порошковых материалов на детали электронных приборов // Обзор по электронной технике. Сер. Технология, организация производства и оборудование. – М.: ЦНИИ «Электроника». – 1978. – Вып. 4. – С. 62.
8. *Robson G. J.* Applications of plasma spraying in Hard facing // Public session and metals technology conf., Sydney. – 1976. – P. 6.5.1–6.5.12.
9. *Хасуй А.* Техника напыления: Пер. с япон. / Под ред. С. Л. Масленникова. – М.: Машиностроение, 1975. – 228 с.
10. *Достанко А. П., Витязь П. А.* Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. – Минск: ФУ АИНФОРМ, 2001. – Т. 3. – 244 с.
11. *Барановский Н. Д., Шаронов Е. А., Ванновский В. В.* Электрические свойства плазменных покрытий для плоских нагревательных элементов // Матер. конф. «Газотермическое напыление в промышленности СССР и за рубежом». – Ленинград, 27–29 мая 1991 г. – Л.: ЛД НТП, 1991. – С. 60–61.
12. *Гриффен Л. А., Дядечко А. Г. и др.* Нагревательные элементы для арматуры, получаемые способом газотермического напыления порошков // Порошк. металлургия. – 1990. – № 5. – С. 102–104.
13. *Плазменное нанесение резистивных слоев ленточного электронагревателя / А. А. Еришов, Э. К. Урбах, В. А. Фалеев, В. С. Чередниченко // Физика низкотемпературной плазмы: Материалы конф. – Петрозаводск: ПГУ, 1995. – Ч. 3. – С. 409–411.*
14. *Аньшаков А. С., Казанов А. М., Урбах Э. К.* Создание низкотемпературного нагревателя способом плазменного напыления // Физика и химия обработки материалов. – 1998. – № 3. – С. 56–61.
15. *Smyth R. T.* Thermal spraying of fine powders // Proc. of 7th Inter. Metal Spray. Conf., London, 1973. – P. 89–95.
16. *Нанесение узкополосных покрытий способом микроплазменного напыления / Ю. С. Борисов, Ю. Н. Переверзев, В. Г. Бобрик, С. Г. Войнарович // Автомат. сварка. – 1999. – № 6. – С. 53–55.*
17. *Кислица А. Н., Кузьмич-Янчук Е. К., Кислица Н. Ю.* Получение узких дорожек способом микроплазменного напыления из NiCr-проволоки // Сб. тез. Всеукр. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов «Сварка и смежные технологии». – Киев, 27–29 мая, 2009 г. – С. 94.
18. *Войнарович С. Г.* Исследование формы и размера пятна напыления и фигуры металлизации в условиях микроплазменного напыления покрытия из гидроксипатита // Вест. НУК. – 2012. – № 3. – С. 81–84.
19. *Анциферов В. Н., Бобров Г. В., Дружинин Л. К.* Порошковая металлургия и напыления покрытия / Под ред. Б. С. Митина. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.

Поступила в редакцию 21.10.2014



**СВАРКА  
И РЕЗКА**  
15-я международная специализированная выставка

**7.04 – 10.04 2015 г.**

Место проведения: Беларусь, Минск,  
проспект Победителей, 20/2  
Организатор: ЗАО «МинскЭкспо»

### Направления экспозиций

- ▶ Материалы для сварки, наплавки и пайки
- ▶ Оборудование и технологии сварки, резки, наплавки, пайки и термообработки
- ▶ Источники питания и системы управления сварочным оборудованием
- ▶ Оборудование для орбитальной сварки и обработки труб
- ▶ Электронно-лучевая, лазерная, плазменная сварка и резка
- ▶ Автоматизированные комплексные системы и агрегаты для сварки и резки
- ▶ Автоматизация сварочных производственных и технологических процессов, программное обеспечение
- ▶ Приборы для неразрушающего контроля сварных соединений
- ▶ Научное и информационное обеспечение сварки
- ▶ Система подготовки, переподготовки и аттестации сварщиков
- ▶ Охрана труда и экологическая безопасность в сварочном производстве
- ▶ Сертификация сварочного оборудования.

Выставка проводится одновременно с международными специализированными выставками «Металлообработка», «Порошковая металлургия» и международным специализированным салоном «Защита от коррозии. Покрытия». Руководитель проекта: Федорова Елена Владимировна, тел.: +375 17 226 98 58, 226 90 83 факс: +375 17 226 98 58, 226 99 36; e-mail: e\_fedorova@solo.by