



УДК 621.793.7:62-69

ИЗГОТОВЛЕНИЕ РЕЗИСТИВНОГО ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЯ СПОСОБОМ МИКРОПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ*

Ю. С. БОРИСОВ, С. Г. ВОЙНАРОВИЧ, А. Н. КИСЛИЦА, С. М. КАЛЮЖНЫЙ, Е. К. КУЗЬМИЧ-ЯНЧУК

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

С целью повышения эффективности нагрева и экономии электроэнергии неоднократно предпринимались попытки создания плоских электронагревательных элементов с применением технологии газотермического напыления электроизоляционного и резистивного слоев. В рамках данной работы было проведено исследование процесса получения плоских электронагревателей способом порошкового микроплазменного напыления. В качестве электроизоляционного материала был выбран Al_2O_3 из-за его высокой электрической прочности (3...5 кВ/мм). Для формирования резистивных покрытий использовали порошок TiO_2 фирмы «Metachim». Анализ микроструктуры полученных покрытий показал, что они равномерные, плотные и не содержат инородных включений. Проведенные на экспериментальном стенде исследования нагревательных свойств макета показали, что максимальная температура нагрева составила 230 °С, а полученная удельная мощность нагревателя — 75 Вт. Библиогр. 7, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: микроплазменное напыление, электронагреватель, оксид алюминия, оксид титана, нагревательные дорожки, температура нагрева

Получение способом газотермического напыления плоских электронагревательных элементов (ПЭН) сопровождается рядом технических трудностей, в числе которых: коробление подложки, значительные потери напыляемого материала, нестабильная величина сопротивления, недостаточная термостойкость и механическая прочность покрытия, что приводит в дальнейшем к перегреву и разрушению резистивного слоя в процессе эксплуатации [1].

ИЭС им. Е. О. Патона (отдел № 73) проведены исследования по изготовлению ПЭН нагревателей способом микроплазменного напыления. Данный способ позволяет наносить качественные покрытия разного рода как из металлических, так и керамических материалов на малоразмерные детали с минимальными потерями напыляемого материала [2–4]. В качестве электроизоляционного материала для нанесения покрытий был выбран порошок оксида алюминия Al_2O_3 (МРТУ 6-09-3916-75) с фракцией –40 мкм из-за его высокой электрической прочности (3...5 кВ/мм) [5]. Для формирования резистивных покрытий использовали порошок оксида титана TiO_2 фирмы «Metachim» (фракция 15...40 мкм). Данный материал выбран исходя из того, что оксид титана обладает полупроводниковыми свойствами с удельным сопротивлением $(0,42...0,55) \cdot 10^{-6}$ Ом·м и коэффициентом термического расширения $8,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, что позволяет использовать данный материал для покрытий в виде нагревательных дорожек, полученных способом газотермического напыления [6]. Для нанесения

покрытий использовали установку МПН-004, общий вид которой приведен на рис. 1.

Основные технические характеристики установки следующие:

рабочий газ	аргон
защитный газ	аргон
мощность, кВт	до 2,5
сила тока, А	10...60
напряжение, В	20...40
расход рабочего газа, л/мин	0,5...5
расход защитного газа, л/мин	1...10
производительность, кг/ч	0,1...2,5
КИМ, %	0,6...0,9
габариты, мм	500×360×650
масса, кг	38,2



Рис. 1. Общий вид установки МПН-004

* В работе принимал участие О. П. Масючок.



Режимы микроплазменного нанесения покрытий

Параметры	Al ₂ O ₃	TiO ₂
Сила тока, А	45	40
Напряжение, В	30	28
Дистанция напыления, мм	150	150
Расход рабочего газа Ar, л/мин	1,3	1,3
Расход защитного газа Ar, л/мин	4	4
Толщина покрытия, мкм	300	100
Производительность, г/мин	1,2	2

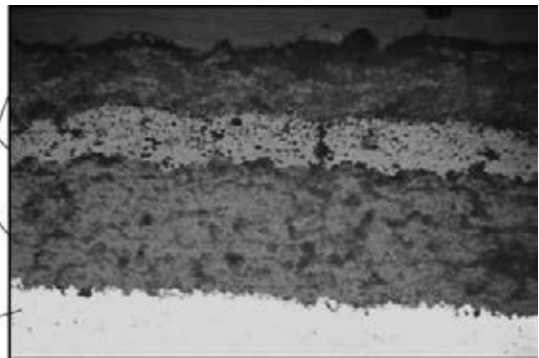


Рис. 3. Микроструктура (×100) трехслойного покрытия нагревательного элемента: 1 — металл основы; 2 — слой Al₂O₃; 3 — слой TiO₂

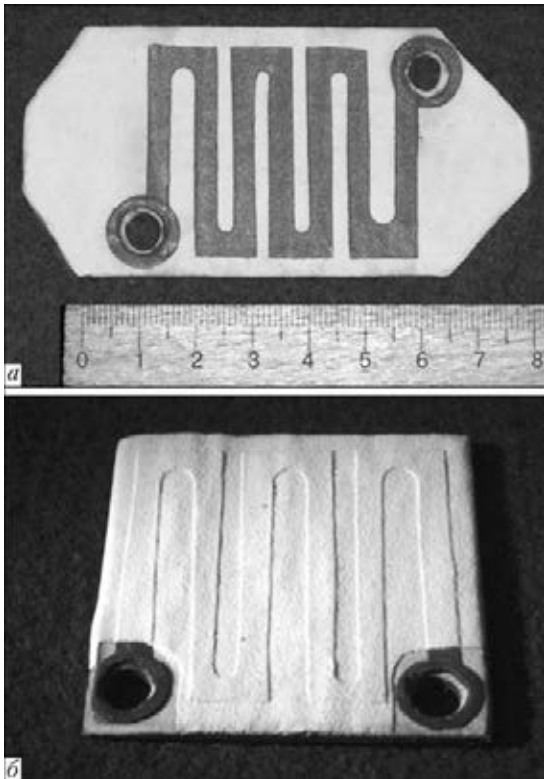


Рис. 2. Макеты электронагревательных элементов с двух- (а) и трехслойным (б) покрытиями

Покрытия были нанесены на образцы из Ст3 размерами 70×45×1 мм (№ 1) и 50×50×2 мм (№ 2). Режимы напыления покрытий из Al₂O₃ и TiO₂ приведены в таблице.

Полученные макеты нагревательных элементов представляли собой зигзагообразные дорожки: длина 312 и 294 мм для образцов № 1 и 2 соответственно, ширина 4 мм, толщина электронагревательного слоя (TiO₂) 100 мкм. Общий вид образцов электронагревательных элементов приведен на рис. 2. Анализ микроструктур покрытий показал, что полученные покрытия равномерные, плотные и не содержат инородных включений (рис. 3).

Проведенные на экспериментальном стенде исследования нагревательных свойств макета по-

казали, что под воздействием тока 0,3 А и приложенном напряжении 250 В происходил нагрев дорожки из TiO₂. При этом максимальная температура нагрева составила 230 °С, а удельная мощность нагревателя — 75 Вт. Дальнейшее повышение температуры привело к потере электропроводности дорожки и прекращению процесса нагрева, по причине полиморфного превращения TiO₂ из структуры анатаза в рутил [7]. При нагреве до 230 °С отслаивания покрытия не происходило, электропроводность нагревательных дорожек сохранялась. Таким образом, показана возможность изготовления ПЭН, работающих до температуры 200 °С, способом микроплазменного напыляемого с использованием в качестве напыляемого резистивного материала TiO₂.

1. Барановский Н. Д., Савицкий В. Е., Сапожников Ю. Л. Повышение надежности тепловых аппаратов с использованием поверхностных электронагревателей на основе органосиликатных материалов. — Л.: Знание, 1989. — 32 с.
2. Microplasma spraying / Yu. Borisov, A. Borisova, Yu. Pereverzev, P. P. J. Ramaekers // Proc. of the 5th Europ. conf. on advanced material and processes, Netherlands, 1997. — Netherlands, 1997. — P. 237–241.
3. 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.
4. 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. — Киев, 2009. — С. 94.
5. Вашкевич Ф. Ф., Спальник А. Я., Плужко И. А. Электротермоизоляция индукторов для внутреннего нагрева трубных заготовок // Строительство, материаловедение, машиностроение. — Днепропетровск: ПГАСА, 2009. — С. 6.
6. Thermally sprayed multilayer ceramic heating elements / S. Scheitz, F.-L. Toma, L.-M. Berger et al. // Thermal spray bul. — 2011. — № 2. — P. 88–92.
7. Мутрев П., Бенвенути Дж., Хофман П. Фазовые переходы в тонких пленках оксида титана под действием излучения эксимерного лазера // <http://journals.ioffe.ru/pjtf/2005/21/p17-23.pdf>.

Поступила в редакцию 12.07.2013