

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МИКРОПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЗИСТИВНОГО НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

Ю. С. БОРИСОВ, С. Г. ВОЙНАРОВИЧ, А. Н. КИСЛИЦА, С. Н. КАЛЮЖНЫЙ, В. Ю. ГЛУХОВСКИЙ
ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В работе описывается получение резистивного нагревательного элемента из многослойных покрытий, которые были нанесены на стальную основу методом микроплазменного напыления. Для формирования узких резистивных дорожек использован TiO_2 в виде порошка с размером частиц 15...40 мкм. В качестве электроизоляции от стальной основы нанесен подслои из Al_2O_3 с размером частиц 40 мкм. Проведенные испытания резистивных нагревательных элементов показали их работоспособность до температуры 200 °С при удельной мощности 75 Вт. Повышение температуры нагрева резистивного нагревательного элемента на воздухе выше 230 °С приводит к потере электропроводности. Основными возможными областями применения таких резистивных нагревательных элементов являются: машиностроительная, химическая и радиоэлектронная промышленности. В результате проведенного эксперимента показана принципиальная возможность изготовления резистивных нагревательных элементов с резистивными дорожками из TiO_2 с применением технологии микроплазменного напыления. Библиогр. 18, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: электронагреватель, резистивный нагревательный элемент, диоксид титана, микроплазменное напыление

Электронагреватели широко используются в бытовых и промышленных устройствах. В домашнем хозяйстве широкое применение нашли такие электронагревательные приборы, как электрические плитки, утюги, электро-водонагреватели, электрокипятильники и так далее. В промышленности электронагреватели используются для нагрева химических растворов, печей по обработке металлов, обогрева шкафов автоматики и станций управления, в изготовлении тепловентиляторов и так далее.

Главной частью электронагревателя является резистивный нагревательный элемент (РНЭ). К материалам, применяемым в промышленном изготовлении РНЭ, предъявляют следующие требования: высокое электрическое сопротивление в сочетании с низким температурным коэффициентом линейного расширения и высокой жаростойкостью. Наиболее распространенные промышленные РНЭ изготавливают из железохромоникелевых и никель-хромовых сплавов марок Х23Ю5, Х23Ю5Т, Х27Ю5Т, Х15Н60 и других, отличающихся высоким удельным электрическим сопротивлением. Использование данных материалов в РНЭ позволяет эксплуатировать их до температур 1200...1300 °С. Следующим классом более высокотемпературных РНЭ являются серийно выпускаемые цилиндрические нагреватели из полупроводниковых керамических материалов SiC, MoSi₂. Нагреватели данного вида используются для нагрева до более высоких температур,

порядка 1500...1700 °С по сравнению с металлическими. В изготовлении РНЭ нашли применение также и другие керамические материалы, характеризующиеся полупроводящими свойствами, такие как ZrO₂, TiO₂, TiC, Cr₃C₂, LaCrO₃ [1–3]. Широкое применение полупроводниковых керамических материалов обусловлено тем, что они имеют более высокое удельное сопротивление и меньший температурный коэффициент линейного расширения, чем металлические. Конструктивной особенностью металлических РНЭ является необходимость электроизоляции токопроводящей спирали от нагреваемой поверхности. В качестве электроизолятора в основном используют воздушную прослойку. Такая конструкция металлических РНЭ приводит к снижению коэффициента теплопередачи, рассеиванию тепла в окружающее пространство, усложнению конструкции и увеличению габаритных размеров РНЭ, что в некоторых случаях влияет на их дальнейший монтаж. Для увеличения коэффициента теплопередачи и уменьшения габаритов электронагревательных приборов возможно применять РНЭ в виде резистивных покрытий (дорожек), нанесенных непосредственно на нагреваемую поверхность [4–6]. Перспективным материалом для применения в РНЭ по своим электрофизическим свойствам является диоксид титана (TiO₂). Материал имеет свойства полупроводника [7, 8] с температурой плавления 1800 °С, успешно используется в электронике, машиностроении и других областях промышленности,

является самым доступным полупроводниковым керамическим материалом на рынке. Имеются также данные по успешному использованию TiO_2 для изготовления РНЭ в виде цилиндрического ролика мощностью 540 Вт [1]. В качестве электроизоляционных материалов используются материалы на основе керамики. Известными представителями таких материалов являются Al_2O_3 , ZrO_2 , Sr_2O_3 . Наибольшее распространение получил Al_2O_3 . Его использование обусловлено высокими диэлектрическими свойствами при повышенных температурах (5...9 кВ/мм) [9] и невысокой стоимостью.

В настоящее время резистивные дорожки получают такими методами, как трафаретная печать, намазка, фотолитография, вакуумно-конденсационное осаждение и другие [4, 5]. Среди существующих методов получения резистивных дорожек в качестве перспективной технологии рассматривается газотермическое нанесение покрытий (ГТНП). Такая технология имеет следующие преимущества: широкий выбор материалов, формирование покрытия на поверхности или локальном участке изделия, изготовленного практически из любого материала, высокая производительность, простота технологического процесса с возможностью его автоматизации.

Материалы и оборудование для нанесения покрытий. В последнее время методы ГТНП позволяют получать покрытия на различных деталях для радиоэлектроники и приборостроения. Есть успешные результаты, демонстрирующие возможности их применения и для изготовления РНЭ [10, 11]. Основными недостатками, препятствующими применению ГТНП для производства РНЭ на существующем оборудовании газотермического напыления, являются большие потери материала при нанесении узких резистивных дорожек шириной менее 6 мм, а также вероятность перегрева и коробления изделия в результате большого термического влияния плазменной струи. Учитывая необходимость формирования тонких, узких резистивных дорожек и предотвращения коробления подложки, было предложено использовать технологию микроплазменного напыления (МПН). Она позволяет получать покрытия из разного рода как металлических, так и керамических материалов, значительно сокращать потери напыляемого материала благодаря небольшому диаметру пятна напыления, оказывая при этом минимальное термическое влияние на подложку [12].

На основании проведенного анализа в качестве материала для получения резистивных покрытий был выбран порошок диоксида титана с размером частиц 15...40 мкм и текучестью 83 с^{-1} (ГОСТ 20899-75). Данный материал имеет линейный коэффициент тепло-

вого расширения $8,19 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ и высокое удельное электрическое сопротивление $3 \cdot 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ [13], химическую стойкость и электропроводность в окислительных газовых средах, достаточную для резистивного саморазогрева от комнатной температуры. Диоксид титана является одним из самых доступных полупроводниковых керамических материалов на рынке. Для нанесения электроизоляционных покрытий использовали порошок Al_2O_3 (МРТУ 9-09-3916-75) с размером частиц 40 мкм и текучестью 130 с^{-1} . С целью повышения коэффициента использования напыляемого материала (КИМ) применили технологию микроплазменного напыления. Данная технология позволяет наносить узкополосные покрытия из разного рода материалов, значительно сокращает потери напыляемого материала благодаря небольшому диаметру пятна напыления (3...5 мм), оказывая при этом минимальное термическое влияние на подложку, что позволяет получать покрытия на тонкостенных деталях без их коробления [14, 15]. В качестве оборудования для нанесения покрытий была использована установка МПН-004, разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона (рис. 1).

Технические характеристики установки МПН-004:

Рабочий газ	аргон
Защитный газ.....	аргон
Мощность плазменной струи, кВт	до 3,0
Ток, А	10...60
Напряжение, В	20...50
Расход рабочего газа, л/мин	0,5...5
Расход защитного газа, л/мин	2...10
Производительность, кг/ч	0,1...2,5
КИМ, %	0,6...0,9
Габариты, мм	500×360×50
Масса, кг	44

Рабочие поверхности РНЭ были изготовлены из стали марки Ст3 размером $70 \times 45 \times 1$ мм (обра-



Рис. 1. Общий вид установки МПН-004

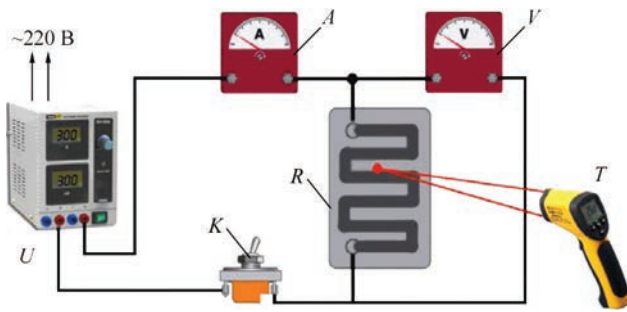


Рис. 2. Схема стенда для исследования свойств резистивных покрытий: *U* — регулируемый источник питания; *K* — выключатель для прерывания подачи электрического тока; *A* — амперметр; *V* — вольтметр; *R* — образец с резистивным покрытием; *T* — тепловизор (пирометр)

зец № 1), и 50×50×2 мм (образец № 2). Газоабразивная обработка рабочей поверхности проводилась электрокорундом марки А95F зернистостью F20-F22, с последующей пятиминутной очисткой поверхности в установке ULTRASONIC CLEANER PS-2 с использованием изопропилового спирта. Электрическая прочность покрытий из Al₂O₃ определялась мегаомметром Ф4102/1. Влияние температуры нагрева на работоспособность резистивной дорожки и мощность РНЭ исследовали на стенде (рис. 2), состоящем из регулируемого источника питания *U*, выключателя для прерывания подачи электрического тока *K*, цифрового мультиметра UNI-T UT70B для измерения тока и напряжения *A*, *V*, тепловизора IRISYS 1020 для измерения температуры и распределения теплоты по РНЭ *T*.

Технические характеристики тепловизора IRISYS 1020:

Диапазон измерений температуры, °С -10...300
Детектор пирозлектрический
приемник 16×16
Порог температурной чувствительности, °С0,3
Погрешность измерения температуры, °С не больше,	± 5
Оптическое поле зрения, по горизонтали×по вертикали, град.	20×20
Спектральный диапазон, мкм8...14
Частота развертки изображения, кадров, Гц < 9
Система наведения указания лазер класс 2

Микроструктуру покрытий из TiO₂, полученных методом МПН, исследовали на микроскопе

Режим микроплазменного нанесения электроизоляционных и резистивных покрытий

Параметры	Состав покрытия	
	Al ₂ O ₃	TiO ₂
Ток, 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
Производительность, г/мин	1,2	2

Neophot 32, пористость определяли методом обработки изображения при помощи компьютерной программы Image Pro 3.

Изготовление и исследование резистивного нагревательного элемента. Процесс изготовления РНЭ состоял из следующих этапов.

1. Перед нанесением электроизоляционных и резистивных покрытий основы образцов из стали марки Ст3 подвергали струйно-абразивной обработке под давлением сжатого воздуха 7 атм. После этого проводили ультразвуковую очистку основ для удаления загрязнений и жировых пленок.

2. Для электроизоляции резистивных дорожек от металлической основы методом МПН наносили электроизоляционный слой Al₂O₃ толщиной 300 мкм.

3. После нанесения электроизоляционного слоя для придания в процессе напыления резистивным дорожкам формы меандра на образцы накладывали маски (на образце № 1 из 7, на образце № 2 из 6 спиралей) с последующим нанесением резистивного покрытия из TiO₂ методом МПН. Параметры нанесения электроизоляционного покрытия и резистивных дорожек приведены в таблице.

4. Сформированные резистивные дорожки имели следующие геометрические размеры: длина дорожки на образцах № 1 и 2 была 312 и 295 мм соответственно, ширина дорожек на обоих образцах составляла 4 мм, толщина резистивного слоя (TiO₂) — 150 ± 50 мкм.

5. Для изоляции резистивных дорожек от окружающей среды на образце № 2 дополнительно поверх дорожек был нанесен тем же методом слой

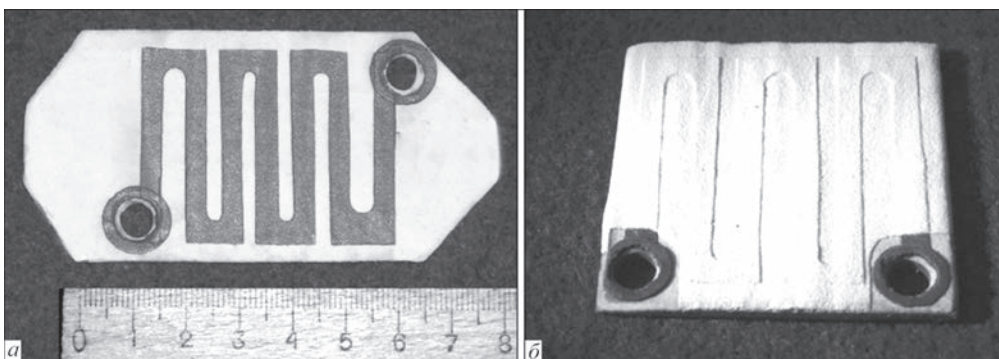


Рис. 3. Резистивный нагревательный элемент: *а* — образец № 1 (двухслойное покрытие из Al₂O₃ и TiO₂); *б* — образец № 2 (трехслойное покрытие из Al₂O₃ и TiO₂)

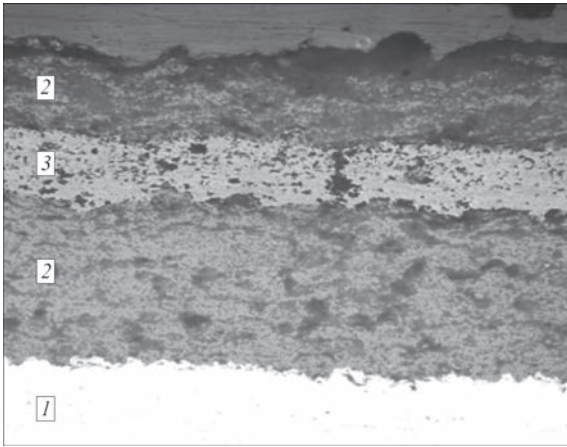


Рис. 4. Микроструктура ($\times 200$) трехслойного покрытия РНЭ № 2: 1 — основа; 2 — слой Al_2O_3 ; 3 — слой TiO_2

Al_2O_3 , толщиной 150 мкм (режимы нанесения в таблице). Внешний вид изготовленных керамических РНЭ и микроструктура нанесенных покрытий приведены на рис. 3 и 4.

Анализ микроструктуры покрытий (рис. 4) показал, что полученные резистивные дорожки имеют равномерную толщину 150 ± 50 мкм, электроизоляционный слой (основа–резистивная дорожка) толщиной 400 ± 100 мкм и внешний электроизоляционный слой толщиной 150 ± 30 мкм. Пористость покрытий из Al_2O_3 составила 20...25 %, а из TiO_2 10...13 %. Проведенное исследование электрической прочности электроизоляционного слоя из Al_2O_3 толщиной 400 ± 100 мкм показало, что она составила 500 МОм при 1000 В на 6 мм^2 . Полученные данные свидетельствуют о том, что покрытие из Al_2O_3 обеспечивает необходимые электроизоляционные свойства [16].

Исследование электропроводности проводили на образце № 1, поскольку он не имел внешнего защитного покрытия из Al_2O_3 , что позволяло измерять температуру резистивной дорожки

непосредственно на ее поверхности без влияния внешнего электроизоляционного слоя. При подаче на токоподводящие контакты РНЭ переменного напряжения в 250 В было получено максимальное значение тока 0,3 А, что соответствует удельной мощности РНЭ 75 Вт. В процессе эксперимента происходил постепенный нагрев резистивных дорожек и распределение тепла по элементу, что фиксировалось прибором IRISYS 1020 (рис. 4) с временным интервалом в 5 с.

На рис. 5, а–г показано зафиксированное прибором IRISYS 1020 распределение тепла по РНЭ согласно шкале температур. Начальная температура РНЭ составляла 26 °С (рис. 5, а). При достижении резистивной дорожкой температуры выше 230 °С произошла потеря проводящих свойств покрытия.

Обсуждение и перспективы. В результате проведенного эксперимента показана принципиальная возможность применения МПН для изготовления РНЭ с использованием порошков TiO_2 для формирования резистивных дорожек. Резистивные покрытия из TiO_2 , полученные методом МПН, позволяют проводить нагрев основы до температуры 200 °С без потери работоспособности РНЭ. Повышение температуры свыше 230 °С приводит к локальному перегреву дорожки с потерей электропроводности. Ограничение температуры и потеря проводимости, очевидно, обусловлено структурой газотермических покрытий, которые отличаются наличием неоднородности и пористостью. В процессе нагрева на воздухе резистивных покрытий, полученных методом МПН из TiO_2 , происходит увеличение сопротивления в зонах с неоднородной структурой покрытия с последующим их перегревом и потерей электропроводности [17, 18].

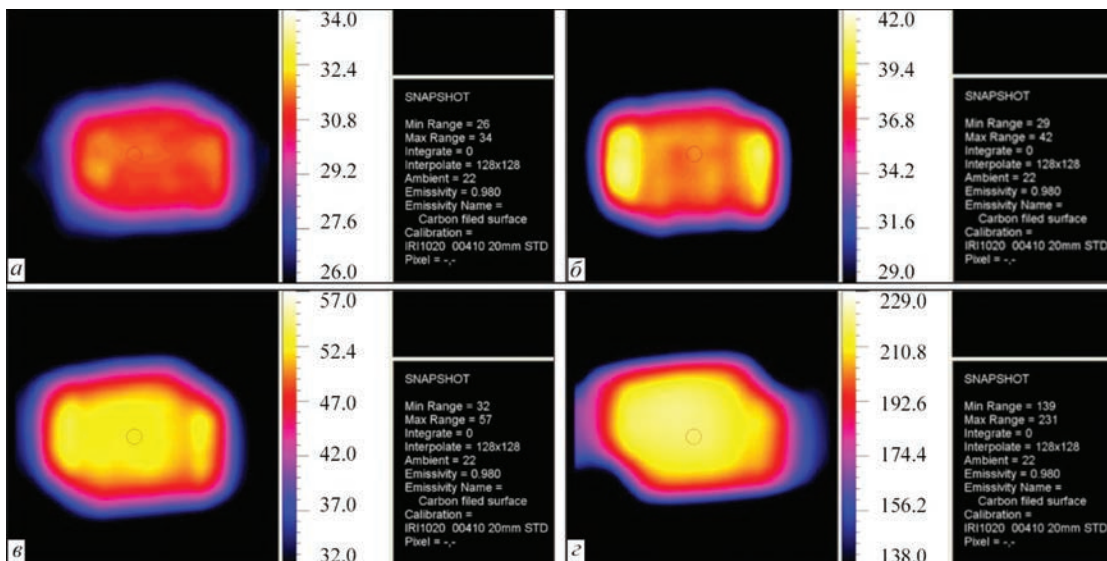


Рис 5. Распределение тепла по резистивным дорожкам из TiO_2 в зависимости от времени (описание а–г см. в тексте)

Данные резистивные покрытия могут найти практическое применение при изготовлении РНЭ для защиты электродвигателей и генераторов от влажности, обогреве водяных насосов в зимний период для предотвращения их обледенения, поддержания постоянной температуры внутри электрошкафов с автоматикой, обогреве задвижных клапанов, а также в производстве спецтехники для суровых климатических условий, где требуется подогрев горюче-смазочных материалов в двигателях внутреннего сгорания.

Выводы

1. Проведен анализ конструктивных особенностей РНЭ и материалов, используемых при их изготовлении. Определены материалы, пригодные для получения резистивных дорожек методом газотермического напыления.

2. Экспериментально доказана возможность получения РНЭ методом микроплазменного напыления. Получены резистивные дорожки из TiO_2 шириной 4 мм и толщиной резистивного слоя 150 ± 50 мкм.

3. Проведенные испытания показали работоспособность РНЭ, полученных методом МПН из TiO_2 , при удельной мощности 75 Вт до температуры $200^\circ C$ без потери электропроводности.

4. Определены области практического применения РНЭ с использованием данных покрытий в аппаратуре и узлах оборудования машиностроительной, химической и радиоэлектронной промышленности.

5. Путем повышения рабочей температуры и стабильности электрофизических свойств резистивной дорожки из TiO_2 может быть ее легирование, например, с использованием Cr_2O_3 .

Список литературы

1. Dipl.-Ing. (FH) Stefan Scheitz, Dr. Filofteia-Laura Toma, Dr. Lutz-Michael Berger and others. (2011) Thermally sprayed multilayer ceramic heating elements. *Thermal spray bulletin*, **2**, 88–92.
2. Барановский Н. Д., Шаронов Е. А., Ванновский В. В. (1991) Электрические свойства плазменных покрытий для плоских нагревательных элементов. *Материалы конф. «Газотермическое напыление в промышленности СССР и за рубежом»*, Ленинград, 27–29 мая 1991 г., Ленинград, ЛД НТП, сс. 60–61.
3. Достанко А. П., Витязь П. А. (2001) *Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники*. Минск, ФУ АИНФОРМ.
4. Иванов А. С., Лебедев Ю. П. (2005) *Нагревательный блок для бытовых электроприборов*. РФ, Пат. 2246804.
5. *Нагревательные элементы фирмы ОНИКС*. <http://опухмef.narod.ru/nagrev.htm>. Доступ на 7. 11. 2017
6. Гоненко Т. В., Хацевский В. Ф., Хацевский К. В. (2010) Инженерный метод расчета плоских многорожечных нагревателей. *Вестник ПГУ*, **3**, 30–34.
7. Хороших В. М., Белоус В. А. (2009) Пленки диоксида титана для фотокатализа и медицины. *Физическая инженерия поверхности*, **7**, **3**, 223–238.
8. Пасынков В. В., Сорокин В. С. (2001) *Материалы электронной техники. Учеб. для студ.* Санкт-Петербург, Лань.

9. Вашкевич Ф. Ф., Спальник А. Я., Плужко И. А. (2009) Электротермоизоляция индукторов для внутреннего нагрева трубных заготовок. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. Днепропетровск, ШАСА, сс. 4–6.
10. Лясников В. Н., Перов В. В., Лаврова В. Н. (1977) Применение плазменно-дугового напыления алунда при изготовлении катодно-подогревательного узла. *Электронная техника: Сер. Электроника СВЧ*, **4**, сс. 85–87.
11. Бакланов Д. И., Беляйков И. Н., Вирник А. М. и др. (1996) *Способ изготовления резистивного нагревательного элемента*. РФ, Пат. 2066514 МКИ H 05 B 3/12.
12. Войнарович С. Г. (2012) Исследование формы и размера пятна напыления и фигуры металлизации в условиях микроплазменного напыления покрытия из гидроксипапатита. *Вестник НУК*, **3**, 81–84. <http://ev.nuos.edu.ua/publication?publicationId=18276>. Доступ на 7. 09. 2017.
13. Самсонов Г. В., Эпик Л. П. (1973) *Тугоплавкие покрытия*. Москва, Металлургия.
14. Борисов Ю. С., Переверзев Ю. Н., Бобрик В. Г. Войнарович С. Г. (1999) Нанесение узкополосных покрытий методом микроплазменного напыления. *Автоматическая сварка*, **6**, 53–55.
15. Кислица А. Н., Кузьмич-Янчук Е. К., Кислица Н. Ю. (2009) Получение узких дорожек методом микроплазменного напыления из NiCr-проволоки. *Сб. тез. Всеукр. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов «Сварка и смежные технологии»*. Киев, 27–29 мая 2009, сс. 94.
16. (1976) ГОСТ 1516.1-76. *Электрооборудование переменного тока на напряжения от 3 до 500 кВ*.
17. Барабанова Е. В. Заборовский К. М., Посадова Е. М., Кастро Р. А. (2013) Влияние пористости на электрофизические свойства керамики ЦТС. *Известия российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена*, **157**, сс. 79–83.
18. Желлова А. И. (1994) *Синтез и электрические свойства оксидной керамики для применения в электронике*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев. <http://tekhnosfera.com/sintez-i-elektricheskie-svoystva-oksidnoy-keramiki-dlya-primeneniya-v-elektronike>. Доступ на 25.07.17.

References

1. Scheitz, S., Toma, F.-L., Berger, L.-M. (2011) Thermally sprayed multilayer ceramic heating elements. *Thermal Spray Bull.*, **2**, 88-92.
2. Baranovsky, N.D., Sharonov, E.A., Vannovsky, V.V. (1991) Electrical properties of plasma coatings for plane heating elements. In: *Proc. of Mathematical Conf. on Thermal Spraying in Industry of USSR and Abroad* (Leningrad, 27-29 May 1991). Leningrad, LD NTP, 60-61 [in Russian].
3. Dostanko, A.P., Vityaz, P.A. (2001) *Plasma processes in manufacture of electronic engineering products*. Minsk, FU AINFORM [in Russian].
4. Ivanov, A.S., Lebedev, Yu.P. (2005) *Heating block for household electric appliances*. Pat. 2246804 RF [in Russian].
5. Heating elements of ONIX Company. <http://mef.narod.ru/nagrev.htm> [in Russian].
6. Gonenko, T.V., Khatsevsky, V.F., Khatsevsky, K.V. (2010) *Engineering approach of calculation of multi-track heaters*. *Vestnik PGU*, **3**, 30-34 [in Russian].
7. Khoroshikh, V.M., Belous, V.A. (2009) Films of titanium dioxide for photocatalysis and medicine. *Fizicheskaya Inzheneriya Poverkhnosti*, **7(3)**, 223-238 [in Russian].
8. Pasyнков, V.V., Sorokin, V.S. (2001) *Materials of electronic engineering: Manual*. St.-Petersburg, Lan [in Russian].
9. Vashkevich, F.F., Spalnik, A.Ya., Pluzhko, I.A. (2009) Electrothermic insulation of inductors for internal heating of tubular billets. In: *Building, Materials Science, Mechanical Engineering*. Dnepropetrovsk, PGASA, 4-6 [in Russian].
10. Lyasnikov, V.N., Perov, V.V., Lavrova, V.N. (1977) Application of plasma-arc spraying of alundum in manufacture of cathode-heating unit. *Elektronnaya Tekhnika. Ser. Elektronika SVCh*, **4**, 85-87 [in Russian].

11. Baklanov, D.I., Belyajkov, I.N., Virnik, A.M. et al. (1996) *Method of manufacturing of resistive heating element*. Pat. 2066514 RF, Int. Cl. H 05 B 3/12 [in Russian].
12. Vojnarovich, S.G. (2012) Examination of shape and size of spraying spot and metalizing figure under conditions of microplasma spraying of hydroxyapatite coating. *Vestnik NUK*, **3**, 81-84 [in Russian]
13. Samsonov, G.V., Epik, L.P. (1973) *Refractory coatings*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
14. Borisov, Yu.S., Pereverzev, Yu.N., Bobrik, V.G., Vojnarovich, S.G. (1999) Deposition of narrow-band coatings by microplasma spraying method. *Avtomatich. Svarka*, **6**, 53-55.
15. Kislitsa, A.N., Kuzmich-Yanchuk, E.K., Kislitsa, N.Yu. (2009) Producing of narrow bands by microplasma spraying method from Ni-Cr wire. In: *Abstr. of Papers of All-Ukrainian Sci.-Tekhn. Conf. of Young Scientists and Specialists on Welding and Related Technologies* (Kyiv, 27-29 May 2009), 94.
16. GOST 1516.1-76: A.c. electric equipment for 3-500 kV voltage [in Russian].
17. Barabanova, E.V., Zaborovsky, K.M., Posadova, E.M., Kastro, R.A. (2013) Influence of porosity on electrophysical properties of PZT ceramics. *Izvestiya A.I.Gertsen GPU*, **157**, 79-83 [in Russian].
18. Zheglova, A.I. (1994) Synthesis and electrical properties of oxide ceramics for application in electronics. In: *Syn. of Thesis of Cand. of Techn. Sci. Degree*. Kiev. <http://tekhnosfera.com/sintez-i-elektricheskie-svoystva-oksidnoy-keramiki-dlya-primeneniya-v-elektronike>.

Ю. С. Борисов, С. Г. Войнарлович, О. М. Кислиця,
С. М. Калюжний, В. Ю. Глуховський

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ МІКРОПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ РЕЗИСТИВНОГО НАГРІВАЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТА

В роботі описується отримання резистивного нагрівального елемента з багатошарових покриттів, які були нанесені на сталеву основу методом мікроплазмового напилення. Для формування вузьких резистивних доріжок використаний TiO_2 у вигляді порошку 15...40 мкм. В якості електроізоляції від сталеві основи нанесено підшар з Al_2O_3 з розміром частинок –40 мкм. Проведені випробування резистивних нагрівальних елементів показали їх працездатність до температури 200 °С,

при питомій потужності 75 Вт. Підвищення температури нагріву резистивного нагрівального елемента на повітрі вище 230 °С призводить до втрати електропровідності. Основними можливими областями застосування таких резистивних нагрівальних елементів є машинобудівна, хімічна і радіоелектронна промисловості. В результаті проведеного експерименту показана принципова можливість виготовлення резистивного нагрівального елемента з резистивними доріжками з TiO_2 із застосуванням технології мікроплазмового напилення. Бібліогр. 18, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: електронагрівач, резистивний нагрівальний елемент, діоксид титану, мікроплазмове напилення

Yu.S. Borisov, S.G. Voinarovich, A.N. Kislitsa,
S.N. Kalyuzhny, V.Yu. Glukhovskii

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

APPLICATION OF THE METHOD OF MICROPLASMA SPRAYING FOR MANUFACTURING RESISTANCE HEATING ELEMENT

The paper provides a description of producing a resistance heating element from multilayer coatings, which were deposited on a steel base by the method of microplasma spraying. TiO_2 in the form of powder with particles of 15–40 μm size was used to deposit narrow resistive paths. A sublayer from Al_2O_3 with 40 μm particle size was deposited to provide electric insulation from the steel base. Performed testing of resistance heating elements showed their serviceability up to the temperature of 200 °C at specific power of 75 W. Increase of the temperature of resistance element heating in air above 230 °C leads to loss of electrical conductivity. The main possible areas for such resistance heating element application are mechanical engineering, chemical and radioelectronic industry. Performed experiment allowed demonstrating the fundamental possibility of manufacturing resistance heating elements with resistive paths from TiO_2 with application of microplasma spraying technology. 18 Ref., 1 Tabl., 5 Ref.

Keywords: electric heater, resistive heating element, titanium dioxide, microplasma spraying

Поступила в редакцію 29.12.2017

9 Международная конференция «ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ»

17–19 сентября 2018 г.

г. Санкт-Петербург (г. Пушкин)

Тематика конференции

- ▶ Физические основы и математическое моделирование лучевых технологий. CAD-CAM-CAE системы.
- ▶ Оборудование и технологии сварки, наплавки и термообработки.
- ▶ Оборудование и технологии аддитивного производства.
- ▶ Оборудование и технологии резки, прошивки отверстий и обработки поверхности.
- ▶ Метрология, системы измерений и дефектоскопия.

Официальные языки конференции: английский, русский

www.ilwt-stu.ru