

Д.А. ГЕОДАКЯН

ПЛЕНОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛИ

I. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И КОНСТРУКЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ (ОБЗОР)

Приведены функциональные и конструкционные особенности пленочных электронагревательных приборов. Проведен обзор литературных источников по конструкциям, составам и технологиям изготовления отдельных узлов и нагревателей в целом, предназначенных для различного применения.

Ключевые слова: нагреватель, пленочный, электрический, устройство, подложка, резистивный элемент, защитное покрытие.

С 70 -х годов прошлого столетия наблюдается устойчивая тенденция замены существующей протяжной элементной базы электронагревательных приборов (трубчатые электронагреватели, спирали, нагревательные стержни и провода) поверхностно-распределенными резистивными элементами, выполненными из металлов, композиционных или полупроводниковых материалов.

Основным требованием, предъявляемым к нагревательным устройствам любого типа, является обеспечение по возможности равномерного распределения температуры по нагреваемой поверхности и постоянного теплового потока на контактной поверхности теплообмена.

Главным недостатком нагревательных приборов с протяженными функциональными элементами является противоречие между низкой температурой обогреваемой среды и высокой температурой электронагревательных элементов. В современных приборах эта проблема решается применением промежуточных теплоносителей (вода, воздух, масло), увеличением теплопередающих твердых массивов или применением инфракрасного излучения. Однако все это понижает тепловой КПД, увеличивает инерционность, уменьшает срок службы и повышает стоимость тепловых агрегатов.

В нагревательных устройствах с поверхностно-распределенными резистивными элементами, обычно называемыми пленочными электронагревателями (ПЭН), резистивный элемент в виде сплошной тонкой пленки или определенного узора равномерно покрывает почти всю поверхность устройства, полностью снимая противоречия и обусловленные ими недостатки нагревательных устройств с протяженными элементами. Равномерное распределение резистивного элемента и минимальная разница между температурами нагреваемой поверхности и окружающей среды исключают необходимость использования дополнительных устройств для теплообмена с окружающей средой и обуславливают основные преимущества ПЭН: универсальность, равномерное распределение теплового потока на контактной поверхности теплообмена, безынерционность, возможность саморегулирования тепловой мощности, увеличение КПД, пожаро,-ожого,-электробезопасность, возможность использования сравнительно недорогих и доступных материалов, отсутствие вредного

воздействия нагревательного элемента на окружающую среду, например, высушивание и ионизация воздуха и т.д.

Сведения о ПЭН впервые появились с середины 70 -х годов прошлого столетия в виде патентов [1-4], число которых с каждым годом увеличивалось. Формально эти сведения можно классифицировать по конструкциям, материалам составных частей, способам изготовления, степени защищенности функциональных узлов от воздействия окружающей среды, рабочей температуре и способности изменения формы ПЭН.

Основными конструкционными элементами ПЭН являются: подложка, выполненная из тонколистового диэлектрического материала или из металлического листа с электроизоляционным покрытием; резистивный электронагревательный функциональный элемент, выполненный в виде тонкой сплошной или узорчатой пленки; защитная оболочка, выполненная в виде тонкослойной газонепроницаемой изоляции; контактные электроды, которые через токоподводы подсоединяются к сети электрического тока (рис. 1).

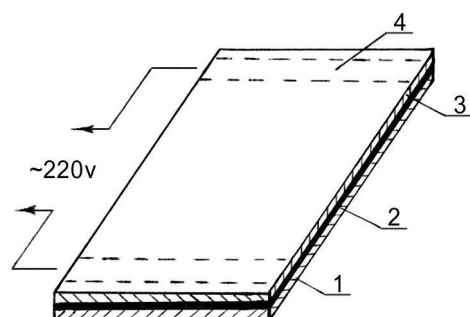


Рис. 1. Классическая модель ПЭН

- 1 - несущий электроизоляционный слой (подложка);
- 2 - резистивный электронагревательный элемент;
- 3 - защитный электроизоляционный слой;
- 4 - контактные электроды

Топологическая модель расположения нагревательного элемента описанной конструкции называется классической моделью [1]. На базе разновидностей классической модели, отличающихся между собой материалами, формами и размерами конструкционных элементов, их расположением относительно друг друга, а также числом резистивных нагревательных элементов, созданы электронагревательные устройства для нагрева жидких термолабильных сред, напольные электронагреватели, панельные электроконвекторы, кухонные электроприборы, стационарные, передвижные или подвесные обогреватели жилых, общественных и промышленных помещений, элементы для сушильных шкафов, камер и боксов, калориферы, вентиляторы, технологические тепловые агрегаты и т.д. [1, 2, проспекты фирм “Синион”, “Спецмаш” и “Экос”, РФ].

Из разновидностей классической модели особо следует отметить модели с двумя и более резистивными элементами, выполненными из материалов с противоположным знаком температурного коэффициента электрического сопротивления (ТКС) [3, 4]. Благодаря параллельному включению таких элементов в электрическую цепь обеспечивается постоянство общего сопротивления элемента, что обеспечивает экономию электроэнергии и долговечность прибора.

Нагревательные устройства с классической топологической моделью расположения функциональных элементов по регулированию электрической мощности относятся к приборам с принудительным регулированием. Они могут развивать температуру от 25 до 2500 °C.

По возможности изменения геометрической формы они могут быть как “жесткими”, так и “гибкими”, по степени защищенности резистивного элемента от воздействия окружающей среды – как “открытыми”, так и “закрытыми” [5].

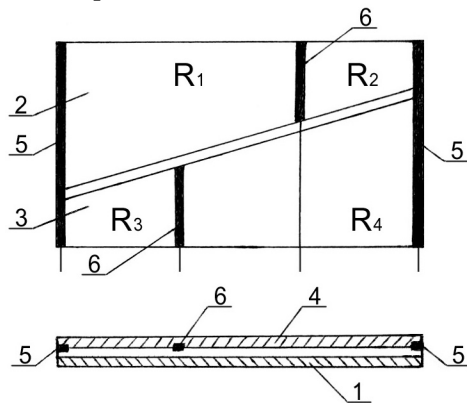


Рис. 2. Топологическая модель ПЭН с саморегулированием
1 - подложка; 2, 3 - резистивные элементы; 4 - защитное покрытие;
5, 6 - токоподводы

Известна также топологическая модель расположения функциональных элементов, обеспечивающая саморегулирование температуры ПЭН (рис. 2) [6]. В этой модели нагревательные элементы 2 и 3 выполнены в виде встречно уложенных на диэлектрическую подложку двух полос резистивной пленки переменной ширины. Основные токоподводы (Т) 5 размещены по краям пленки, а дополнительные (Т) 6 установлены на каждой из полос и делят их на участки с одинаковым сопротивлением. Устройство работает аналогично измерительному мосту (рис. 3), плечами которого являются сопротивления четырех участков резистивной пленки, изменяющейся в зависимости от температуры.

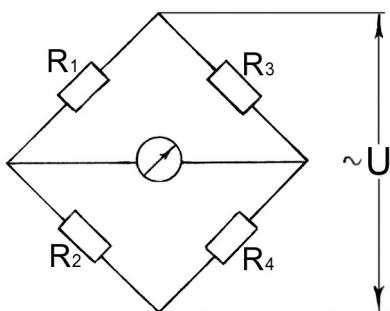


Рис. 3. Схема подключения резистивных элементов

Разбаланс такого моста пропорционален абсолютному значению ТКЭС пленки и значительно возрастает, когда участки резистивной пленки 1, 4 (R_1 , R_4) и 2, 3 (R_2 , R_3) выполнены из материалов с противоположным знаком ТКЭС.

Подложка как в описанной схеме, так и в приборах классической модели может быть выполнена из достаточно прочного и теплопроводящего материала, обеспечивающего целостность конструкции при минимальной инерционности в рабочей области температур. Такими материалами являются тонкие каменные, керамические, стеклянные и ситалловые листы, покрытые стеклоэмалью или другим электроизоляционным слоем, металлические листы толщиной 0,5...0,8 мм, электротехнический картон, асбест, пластмасса и резина [1, 5, проспекты фирм “Синион”, “Спецмаш” и “Экос”, РФ]. При этом несущая подложка может быть сформирована как предварительно, так и после сборки нагревателя путем совместной термообработки. Предлагаются также многослойные подложки, например, состоящие из двуоксида кремния, нитрида кремния или их смесей с добавками кремния в качестве теплопроводящей фазы [7]. В другой работе [8] тонкие стеклянные листы соединяются между собой кремнеорганическим эластомером, образуя термостойкую и ударопрочную подложку. Подложку с такими же свойствами получают склеиванием между собой стеклотканевых заготовок, пропитанных термореактивной силиконовой смолой [9].

Острумное решение формования многослойного корпуса (основание + крышка) ПЭН нашли авторы работы [10]. Они предлагают корпус, состоящий из не менее трех чередующихся слоев тугоплавкого оксида и тугоплавкого металла, причем толщина слоя металла составляет от 0,2 до 2 -х толщин оксидного слоя. Благодаря чередованию оксидных и металлических слоев корпус приобретает газонепроницаемость, высокую устойчивость в окислительной среде, высокую теплопроводность и высокие механические свойства, в том числе ударопрочность и термостойкость. Резистивный элемент из тугоплавкого материала, заключенный в такой корпус, благодаря перечисленному сочетанию свойств за считанные минуты может развивать температуру до 2300...2500 °C.

Из-за сравнительно низкой термостойкости органические материалы, стекла и ситаллы непригодны для изготовления подложек или корпусов ПЭН с рабочей температурой выше 1000...1200 °C. Для этой цели непригодны также нежаропрочные или окисляющиеся на воздухе металлы и сплавы. Многие керамические материалы, в том числе оксиды и силикаты Mg, Ca, Sr, Al, Zr, обладают достаточной устойчивостью и диэлектрическими свойствами при высоких температурах и после обжига обеспечивают защищенность резистивных элементов от воздействия окружающей среды. К сожалению, все они, из-за сравнительно невысокой термостойкости, не могут быть использованы в ПЭН с рабочей температурой выше 800...1000 °C.

Повышение термостойкости керамических материалов является важнейшей задачей, обусловленной не только требованиями ПЭН, но и таких областей науки и техники, как космонавтика, скоростная авиация, ракетостроение, атомная и обычная энергетика, автомобилестроение, приборостроение и т.д.

Нами выдвинута концепция повышения термостойкости керамических материалов путем снижения их температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) с помощью добавок, обладающих отрицательным значением ТКЛР. Концепция достаточно обоснована как теоретически, так и экспериментально [11, 14]. Полученные керамические композиции

использованы для приготовления подложек и корпусов ПЭН с рабочей температурой 1300 °С и выше [5, 12].

Выбор резистивного материала, предназначенного для формования нагревательного элемента ПЭН, осуществляется в зависимости от ожидаемой рабочей температуры и гибкости нагревателя. Так, в “жестких” ПЭН с высокой рабочей температурой в качестве нагревательного элемента используют вытравленную определенным узором металлическую фольгу или нанесенную на подложку любым способом металлическую пленку. Металлическую фольгу закрепляют на керамическую подложку органической связкой, стеклом или другими связующими материалами. Для нанесения (формования) металлической пленки используют трафаретную печать, вакуумное, воздушно-капельное или плазменное напыление, электролитическое осаждение и т.д. Для фиксации металлической пленки на подложку часто используют метод спекания. Для формования “жестких” нагревательных элементов сравнительно высокотемпературных ПЭН используют также композиции, состоящие из электропроводящих, диэлектрических и связующих компонентов.

В качестве электропроводящих компонентов применяют порошки драгоценных и обычных металлов, оксидные полупроводники, высокотемпературные полупроводниковые соединения переходных металлов (карбиды, нитриды, силициды и бориды), углеграфитовые порошки и т.д [1-3, 15, 16].

Диэлектрические компоненты в резистивных композициях используются, в основном, для разбавления проводящей фазы и регулирования тем самым электрического сопротивления резистивного элемента. В качестве таких материалов применяют тонкодисперсные порошки корунда, муллита, кремнезема, свинцового сурика, обожженных бентонитовых глин, других материалов и горных пород.

В качестве связующих компонентов в резистивных композициях используют стекла и ситаллы различного состава и органические связующие.

Нанесение резистивной композиции на подложку сплошной пленкой или определенным узором осуществляют аналогично формованию металлической пленки, описанной выше.

В “гибких”, сравнительно низкотемпературных ПЭН в качестве нагревательного элемента используют резистивные композиции, содержащие разнородные электропроводящие порошки, органические пленкообразующие и связующие материалы. Подложка и электроизоляционное защитное покрытие таких ПЭН также изготавливаются из органических полимерных материалов [1, 2, проспекты фирм “Синион”, “Спецмаш” и “Экос”, РФ].

Считалось, что перенос электричества в композиционных резистивных элементах осуществляется через цепочки непосредственно контактирующих между собой частиц электропроводящей фазы. Роль диэлектрических добавок сводилась только к разбавлению проводящей фазы путем разрыва проводящих цепочек. При этом предполагалось, что главной причиной выхода из строя ПЭН являются дуговые разряды, обусловленные электрическим пробоем диэлектрического материала, разделяющего электропроводящие частицы.

Подробные исследования резистивных композиций, приготовленных нами на основе различных электропроводящих материалов (Al, Ni, Fe, Cu, бронза, Fe-Cr-Ni), стекол (силикатные, фосфатные, свинцовые) и керамических наполнителей (Al_2O_3 , горные породы), показали, что диэлектрические составляющие композиций, особенно стекло и стеклокристаллические материалы, обволакивая тонким слоем проводящие частицы, также участвуют в переносе электричества. В результате, помимо снижения среднего значения

электрической проводимости резистивного элемента, происходит значительное уменьшение его ТКЭС, что очень важно для экономии электроэнергии и регулирования температурного режима ПЭН [17].

В качестве токоподводов нагревательных элементов ПЭН используют металлические сетки, решетки, проволоку, фольгу, пленку и т.д. Металлические сетки и пленки преимущественно накладывают на резистивный слой через токопроводящую пасту, решетки, фольгу и проволоку – на подложку под резистивной пастой. При нанесении токопроводящей пленки пользуются трафаретной печатью, воздушно-капельным или плазменным напылением, электролитическим осаждением и т.д.

В качестве электроизоляционных защитных материалов нагревательных элементов ПЭН используются стеклоэмали, диэлектрические оксиды, горные породы и глины, органические полимеры, а также материалы самой подложки. Важно, чтобы защитное покрытие, обладая высокими электроизоляционными свойствами и газонепроницаемостью, не содержало токсичных веществ и было химически пассивным по отношению к резистивному материалу и токоподводам.

Хотя в любом случае резистивные элементы ПЭН защищены от воздействия окружающей среды, условно по этому принципу их подразделяют на две основные группы – “открытые” и “закрытые”. В первую группу включают нагреватели с защитными покрытиями, во вторую – заключенные в герметические корпуса, выполненные из материала подложки. В низкотемпературных ПЭН (25...100 °C), как отмечалось выше, такие корпуса выполнены из органики, в среднетемпературных (80...300 °C) – из металла, стекла или ситалла, в высокотемпературных (300...1000 °C) – из керамики и горных пород, в сверхвысокотемпературных (выше 1000 °C) – из термостойкой или многослойной, чередующейся с металлом керамики.

Изготовление ПЭН на металлических подложках аналогично технологии шликерного эмалирования и включает следующие основные операции:

- формирование корпуса и подготовка его к эмалированию (обезжиривание, травление);
- многослойное эмалирование;
- нанесение, сушка и термообработка (обжиг) резистивного элемента;
- металлизация или закрепление контактных электродов;
- нанесение, сушка и термообработка герметизирующего покрытия;
- подключение ПЭН к токоподводящей и терморегулирующей системе.

Технология изготовления ПЭН на керамической или другой жесткой диэлектрической подложке отличается от вышеизложенного отсутствием процесса эмалирования, а на сырой керамической или термореактивной органической подложке – дополнительной совместной термообработкой ПЭН в монолитную конструкцию.

Контроль качества изоляции ПЭН особенно важен в случае металлических подложек. Небольшая толщина ($< 1\text{ мм}$) стеклоэмалевого покрытия при значительной площади соприкосновения с токоподводящими и резистивными элементами предопределяет необходимость использования стекол с очень высокими диэлектрическими свойствами для предотвращения электрического пробоя. Задача еще более усложняется при повышенных температурах, когда изоляционные свойства стеклоэмалей резко снижаются. Поэтому такие подложки рекомендуются для использования при рабочих температурах ПЭН, не превышающих $300\ldots 400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Контроль сопротивления резистивного элемента проводится для корректировки электрических параметров ПЭН. Корректировка осуществляется изменением геометрических размеров (толщина, ширина) резистивного слоя методами механического или химического удаления лишнего или нанесения дополнительных слоев.

Токоподводящая и регулирующая системы подбираются в зависимости от топологической модели расположения и числа резистивных элементов. Так, ПЭН классической модели подключают в принудительную схему регулирования температуры (мощности) выбранной модификации. Саморегулирующиеся модели не нуждаются во внешних регулирующих устройствах.

Подводя итоги, можно констатировать:

1. в последние 30-35 лет по сути создан новый класс нагревательных элементов, сочетающих такие ценные качества, как безынерционность, высокие удельные мощности, стойкость по отношению к агрессивным газовым и жидким средам, низкая материалоемкость, высокий КПД, безопасность эксплуатации и т.д.;
2. основные конструкционные решения ПЭН и топологические модели формирования электрорезистивных нагревательных элементов достаточно просты и интересны с точки зрения экономии электроэнергии, безопасной эксплуатации и саморегулирования тепловым режимом приборов;
 - определен круг материалов, необходимых для формирования функциональных и конструкционных узлов ПЭН, предложены простые технологические решения и приемы их подготовки и изготовления ПЭН самого различного назначения с рабочей температурой $25\ldots 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$;
3. для надежной работы нагревателей выше $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ требуется резкое повышение их термостойкости, что на практике может быть достигнуто использованием многослойной, чередующейся с металлом керамики или высокотермостойкой керамической композиции. С учетом технологических сложностей и ограниченной надежности первого способа в наших исследованиях выбран путь разработки соответствующей керамики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Низкотемпературные электронагреватели в сельском хозяйстве / Под общ. ред. **Л.С. Герасимович**. – Минск: Ураджай, 1984. – 118с.
2. **Гуль В.Е.** и др. Электропроводящие полимерные материалы - М.: Химия, 1968 - 43с.
3. Пат. США № 4.486.651, Н 05 В 3/10, 1985.
4. Заявка Японии № 56-35270, Н 05 В 3/00, 1981.
5. **Գեղդակյան Զ.Ա.** Թաղանթային էլեկտրատաքացուցիչների հիմնական առանձնահատկությունները // Գիտություն և տեխնիկա. - 2001. - N 7-9. - էջ 26-29:
6. А.с. СССР № 1202081, Н 05 В 3/14, 1985.
7. Пат. США № 4.364.100, Н 05 К 1/03, 1983.
8. Заявка ФРГ № 2.616.855, Н 05 В 3/28, 1980.
9. Заявка Японии № 54-25254, Н 05 В 3/34, 1979.
10. А.с. СССР № 1016853, Н 05 В 3/18, 1983.
11. **Геодакян Дж.А., Симонян А.М., Степанян С.В., Геодакян К.Д.** Термостойкие керамические композиции. 1. Постановка задачи // Огнеупоры и Техническая Керамика. – 2006. - № 8. - С. 2-7.
12. **Խրիմյան Ն.Գ.** Ջերմակայուն ալյումաօքսիդային վակուումիսիտ խեցեղեն // ՀՀ ԳԱԱ գիտ. և արաջատար տեխնոլոգիաների ազգային հիմնադրամ: Հայաստանի քիմիական գիտությունը XXI դարի շեմին - թեզիսների ժողովածու. - Երևան, 18-20.05.2000. - էջ 92.
13. **Geodakyan J.A., Kostanyan A.K., Petrosyan B.V., Sagatelyan S.T., Pogosyan E.G., Geodakyan K.J.** Preliminary Results on the Development of Thermal-Shock Resistance Aluminium Oxide Ceramics // International conference “Nonisothermal phenomena and processes” in honor of the 75th Anniversary of Professor Alexander G. Merzhanov, Yerevan, November 2006, - Book of Abstracts, P. 124-125.
14. ՀՀ Արտոնագիր N 1963, С 04 В 33/00, С 03 С 10/00, 2007.
15. ՀՀ Արտոնագիր N 554828, Н 05 В 3/14, 2007.
16. **Геодакян Д.А., Степанян С.В., Геодакян К.Д.** Возможность получения объемных резисторов на основе стеклометаллических композиций // Труды международной научно-практической конференции “Наука и технология силикатных материалов – настоящее и будущее”. - М., 2003. - Т. 3, - С. 262.
17. **Геодакян Д.А., Степанян С.В., Сагателян С.Т.** Окисление тонкодисперсных порошков металлов на воздухе и в смесях со стеклами // Տեղեկագիր Հայաստանի շինարարների - հատուկ թողարկում. - 2001. - 2(20). - էջ. 17-19:

НПП Материаловедения РА.

Материал поступил в редакцию 10.07.2007.

Ջ.Ա. ԳԵՈՂԱԿՅԱՆ

ԹԱՂԱՆԹԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐՈՍԱՔԱՑՈՒՑԻՉՆԵՐ

1. ՖՈՒՆԿՑԻՈՆԱԼ ԵՎ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱՅԻՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ (ԱԿՆԱՐԿ)

Բերված են թաղանթային էլեկտրատաքացուցիչ սարքերի ֆունկցիոնալ և կառուցվածքային առանձնահատկությունները, տաքացուցիչների և նրանց առանձին հանգույցների կառուցվածքի, բաղադրության և պատրաստման վերաբերյալ եղած հայտնի գրական աղբյուրների վերլուծությունը:

Առանցքային բառեր. տաքացուցիչ, թաղանթային, էլեկտրական սարք, տակդիր, դիմադրողական տարր, պաշտպանիչ ծածկույթ:

J.A. GEODAKYAN

FILM ELECTRIC HEATERS

1. FUNCTIONAL AND CONSTRUCTIONAL FEATURES (REVIEW)

The functional and constructional features of film electric heaters are listed. Reviews of literature sources on constructions, compositions and technologies of producing separate junctions and heaters in general for all types of use are given.

Keywords: heater, film, electric, device, substrate, resistive element, protective coat.