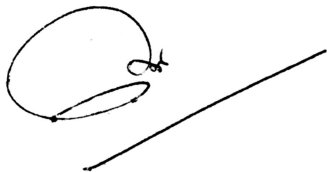


ПЬЮ МЫНТ ВЕЙ

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА БАЗЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ
ПОРОШКОВ ВОЛЬФРАМА**

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Москва – 2015

Работа выполнена в Калужском филиале федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

Научный руководитель: **Мазин Анатолий Викторович**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Степович Михаил Адольфович**
доктор физико-математических наук,
профессор ФГБОУ ВПО «Калужский
государственный университет им. К.Э.
Циолковского», профессор

Хабибулин Рашид Исмаилович
кандидат технических наук
ОАО «Эколом – Восход», технический
директор

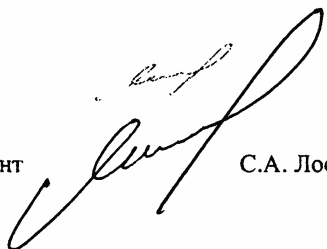
Ведущая организация: **Открытое акционерное общество «Биметалл»**

Защита состоится «20» мая 2015 года в 12 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.17 при ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» по адресу: 248600, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» и на сайтах www.bmstu.ru, www.bmstu-kaluga.ru.

Автореферат разослан «18» марта 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



С.А. Лоскутов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы работы

Научно-технические задачи совершенствования существующих и разработки новых эффективных изделий электроники непрерывно связаны с исследованиями и разработкой теплоотводящих и эмиттирующих материалов, обеспечивающих заданный уровень параметров электронных узлов и компонентов. В связи с этим очевидна актуальность проведения исследований, комплексно описывающих физические процессы, происходящие при синтезе прессованных электродных и каркасных и псевдосплавных композиций, а также позволяющих определить состав компонентов и конструкции конечных изделий, обладающих заданными электрофизическими параметрами.

При этом следует отметить, что проведение подобной работы является следствием необходимости повышения эффективности отечественных изделий полупроводниковой, вакуумной и газоразрядной техники.

Приведенные утверждения дают основания считать представленную работу важной и актуальной.

Целью диссертационной работы являлась разработка физико-технических основ создания композиционных материалов на базе промышленных порошков вольфрама, включающих аналитические и экспериментальные исследования зависимости параметров конечных изделий от составов исходных компонентов условий спекания и пропитки тугоплавких каркасов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработаны новые аналитических подходы к прогнозированию и оперативному контролю параметров вольфрам-оксидных и вольфрамово-медных псевдосплавных материалов;

- определены закономерности, выражающие взаимосвязь основных физических параметров процесса изготовления с характеристиками композиционных эмиттирующих материалов на основе промышленных порошков вольфрама;

- экспериментально подтверждены оптимальные режимы технологических операций производства каркасных материалов на основе вольфрама.

Научная новизна работы. В ходе выполнения работы были впервые получены следующие результаты:

- на базе аналитических исследований разработан способ определения физических параметров каркасных псевдосплавных материалов, базирующийся на измерении их удельного веса;

- разработаны оптимальные приемы производства каркасных материалов на базе вольфрамового порошка для теплоотводящих элементов электроники;

– разработана конструкция и технология изготовления композиционного электрода, обеспечивающая появление эффекта полого катода в условиях дугового разряда низкого давления.

Предмет исследования – физические процессы, происходящие при синтезе прессованных электронных, каркасных и псевдосплавных композиций, позволяющих определить состав компонентов и конструкции конечных изделий, обладающих заданными электрофизическими параметрами.

Объектами исследования в работе являлись:

1. Композиционные каркасные материалы, изготовленные на базе вольфрамового порошка.
2. Характеристики СВЧ транзисторов, полупроводниковых силовых модулей и приборов дугового разряда.

Границами исследования являются вопросы, связанные с измерением всего комплекса параметров в процессе контроля качества материала при его производстве.

Теоретическая и практическая ценность работы состоят в том, что результаты проведенных исследований использованы для организации промышленного производства материалов для теплоотводящих и термоэмиссионных элементов электроники.

При этом разработаны:

- основные операции изготовления, обеспечивающие достижение, близкие к теоретически возможным, физических параметров каркасных псевдосплавов ВД10, ВД20 и ВД30, предназначенных для отвода тепла от полупроводниковых компонентов и узлов;
- термоэмиссионный электрод, работающий на эффекте полого катода и обеспечивающий, в связи этим, минимальное распыление в условиях воздействия дугового разряда низкого давления.

Достоверность результатов работы обусловлена корректной постановкой задачи, применением математически обоснованных методов ее решения, соответствием результатов известным экспериментальным данным.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Разработанный способ определения физических параметров каркасных псевдосплавных материалов, базирующийся на измерении их удельного веса.
2. Определенные в работе оптимальные приемы производства каркасных материалов на базе вольфрамового порошка для теплоотводящих элементов электроники.
3. Разработанный каркасный термоэмиссионный материал на основе вольфрамового порошка.
4. Результаты экспериментальных исследований и конструкция электрода, обеспечивающая появление эффекта полого катода в дуговом разряде низкого давления.

Личный вклад автора состоит в разработке методики нахождения параметров псевдосплавных каркасных материалов по их удельному весу, проведении расчетов указанных параметров, постановке экспериментальных работ. получении результатов теоретических и экспериментальных исследований с последующей их обработкой и анализом.

Апробация работы. Основные материалы работы были представлены на следующих конференциях:

1. Региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Студенческая Научная Весна МГТУ им. Н.Э. Баумана - 2012» (Москва, 2012г.);
2. Всероссийской научно-технической конференции «Научное развитие технологий в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе МГТУ им. Н.Э. Баумана» (Москва, 2012г., 2013г., 2014г.).

Публикации. По теме диссертации имеется 11 публикации, из которых три публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и приложений. Ее общий объем составляет 115 страниц, включая 36 рисунков, 7 таблицы и список литературы из 84 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, ее практическое значение, формулируются основные цели исследования и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации проведен критический обзор литературных данных о современном состоянии производства композиционных материалов на основе порошков вольфрама и меди, областей их применения, существующего уровня параметров и возможностей их улучшения.

Композиционные каркасные материалы, изготовленные на базе вольфрамового порошка, являются одним из основных элементов, обеспечивающих мощностные характеристики СВЧ транзисторов, полупроводниковых силовых модулей и приборов дугового разряда. При этом сделаны следующие выводы.

1. Существующая в настоящее время технология производства вольфрамовых псевдосплавов методами прокатки порошков не может обеспечить существующие требования к параметрам теплоотводящих элементов.

2. Применяемые в настоящее время термоэмиссионные электроды для приборов дугового разряда исчерпали возможности улучшения характеристик.

3. Для обеспечения параметров композиционных теплоотводящих материалов на базе промышленных порошков вольфрама, максимально близких к теоретическим, необходимо применять методы пропитки.

4. Использование методов заполнения пор каркасных вольфрамовых порошковых заготовок позволит повысить стойкость термоэмиссионных электродов при работе в условиях дугового разряда низкого давления.

Вторая глава посвящена технике эксперимента и определению аналитических методов исследования основных характеристик композиционных материалов на базе вольфрама.

Исходя из задач, поставленных в диссертационной работе, в качестве основного метода для исследования коэффициентов термического расширения разрабатываемых композиционных материалов металлов, определен метод, базирующийся на использовании дилатометрического оборудования.

Для исследования пористости вольфрамовых каркасов и их удельного веса применен метод гидростатического взвешивания, разработаны приемы его практической реализации для проведения экспресс-анализа.

Одним из основных параметров псевдосплавных материалов является коэффициент теплопроводности, определяющий их пригодность для создания теплоотводящих элементов. Учитывая необычайно высокие цены промышленных приборов для измерения тепловых параметров материалов, в диссертации разработана методика для исследования коэффициентов теплопроводности вольфрамовых композиционных материалов, а также разработано и изготовлено оборудование, позволившее с достаточной точностью исследовать эти параметры.

В третьей главе изложены результаты разработки физико-технических основ изготовления композиционных материалов на базе вольфрама.

Как уже было сказано, композиционные материалы на базе вольфрама находят весьма широкое применение в электронной технике. Вольфрамово-медные псевдосплавы (ВД) используются при изготовлении корпусов силовых полупроводниковых приборов, СВЧ-транзисторов. Они обладают достаточно высокой теплопроводностью, возможностью варьирования коэффициента теплового расширения, большей жесткостью, причем эти параметры могут изменяться в зависимости от процентного состава входящих материалов и технологии изготовления псевдосплава. Измерение всего комплекса параметров в процессе контроля качества материала при его производстве требует наличия целого комплекса измерительного оборудования, специально подготовленного персонала. В диссертации показана возможность определения всех параметров псевдосплавного каркасного материала по результатам нахождения его удельного веса.

В основу этого утверждения положены предположения, предложенные Л.И. Тучинским. В соответствии с ними псевдосплав представляет собой пористый каркас из вольфрама, поры в котором заполнены медью. С небольшими допущениями структуру можно представить в виде двух взаимопроникающих матриц – вольфрамовой и медной. На Рис.1 изображено перпендикулярное сечение каркаса псевдосплава «а» и его отдельный элемент «б». На Рис.2 показано сечение элемента каркаса, а на Рис.3

рассмотрен отдельный элемент в виде его сечений по слоям. Используя эту модель можно рассчитать некоторые параметры, например, модуль Юнга.

При нагружении псевдосплава слои (Рис.3) деформируются совместно, т.е. $\varepsilon_I = \varepsilon_{II} = \varepsilon_{III} = \varepsilon_k$ (здесь $\varepsilon_I, \varepsilon_{II}, \varepsilon_{III}$ - соответственно деформации слоев I, II и III в направлении действия силы, ε_k - деформация композиции в целом). При таком нагружении модуль Юнга всего характерного элемента можно выразить через модули Юнга слоев по правилу смесей

$$E_k = E_I V_I + E_{II} V_{II} + E_{III} V_{III} = 2E_I V_I + E_{II} V_{II},$$

где E_I, E_{II}, E_{III} - эффективные модули упругости слоев I, II и III в направлении действия внешней силы; V_I, V_{II}, V_{III} - объемные доли слоев I, II и III в композиции соответственно.

Откуда $E_k = E_I(1-c) + E_{II}c$.

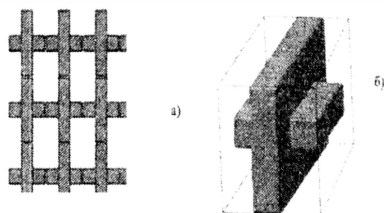


Рис. 1. Сечение каркаса псевдосплава и его отдельный элемент

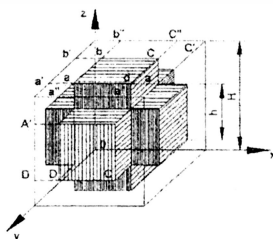


Рис. 2. Сечения элемента конструкции псевдосплава

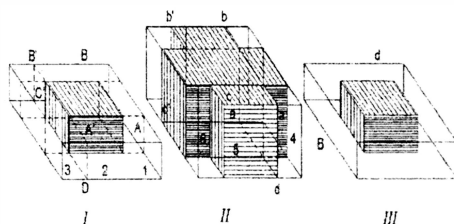


Рис.3. Разделение элемента материала на слои

Для определения E_I разобьем слой I вертикальными плоскостями BB'CC' и AA'D'D на три подслоя 1, 2 и 3 (подслои 1 и 3 идентичны).

Значения V_I, V_{II} легко находятся из геометрических соображений:

$$V_I = (H - h)/2H = 0,5(1 - h/H) = 0,5(1 - c); \quad (1)$$

$$V_{II} = h/H = c; V_{III} = V_I, \quad (2)$$

Тогда по правилу смесей

$$E_I = 2E_1V_I + E_2V_2, \quad (3)$$

где E_1 и E_2 - эффективные нормальные модули упругости подслоев 1 и 2; V_I и V_2 - объемные доли подслоев 1 и 2 в слое 1.

Легко установить, что

$$V_I = 0,5(1 - c) \text{ и } V_2 = c. \quad (4)$$

Модуль E_I равен модулю упругости компонента А, т.е. $E_I = E_A$. Величину E_2 можно рассчитать, если мысленно разделить подслои 2 горизонтальными сечениями на три параллелепипеда A'B'C'D'M'N'ICL', MN'K'L'MNKLI и MNKLABCD. Во всех этих параллелепипедах действует одинаковое напряжение а, а линейная деформация подслоя 1 в направлении действия силы равна сумме деформаций этих трех параллелепипедов. Как известно, в этом случае между модулем Юнга системы E_2 и модулем Юнга составляющих ее параллелепипедов существует приближенная зависимость

$$1/E_2 = V_{A2}/E_A + V_{B2}/E_B,$$

где V_{A2} , V_{B2} - объемные доли вещества А к В в подслое 2 соответственно; E_A и E_B - модули фаз А и В, из которых состоят параллелепипеды соответственно.

Из геометрических построений видно, что $V_{A2} = (1 - c)$, $V_{B2} = c$, следовательно

$$1/E_2 = (1 - c)/E_A + c/E_B. \quad (5)$$

Подставив выражения (1) - (4) в (5), получим

$$E_I = E_A(1 - c) + E_A E_B c / [E_A c + E_B(1 - c)]. \quad (6)$$

Аналогичным образом можно провести расчет эффективного модуля Юнга слоя II. Разделив его вертикальными сечениями bb'c'c и pp'q'q на подслои 4, 5 и 6, можно получить:

$$E_{II} = 2E_4V_4 + E_5V_5,$$

где E_4 и E_5 - эффективные модули Юнга подслоев 4 и 5; V_4 и V_5 - объемные доли подслоев 4 и 5 в слое II соответственно.

Так как $V_4 = (1 - c)/2$; $V_5 = c$, то

$$E_{II} = E_4(1 - c) + E_5c.$$

После разбиения горизонтальными сечениями подслоя 4 на три параллелепипеда $m'n'k'l'a'b'c'd'$, $mnklm'n'k'l'$ и $abcdmnkl$, модуль упругости этого подслоя выразится в виде

$$1/E_4 = V_{A4}/E_A + V_{B4}/E_B,$$

где V_{A4} , V_{B4} - объемные доли вещества А и В в подслое 4 соответственно. Так как $V_{A4} = 1 - c$ и $V_{B4} = c$, то

$$1/E_1 = 1 - c/E_A + c/E_B.$$

Учитывая, что $E_3 = E_B$, получаем выражение для эффективного модуля упругости слоя II.

$$E_{II} = E_B c + E_A E_B (1 - c) / [E_A c + E_B (1 - c)]. \quad (7)$$

После выполнения соответствующих подстановок получаем зависимость, выражающая связь модуля упругости композиционного материала с каркасной структурой с модулями упругости и концентрациями составляющих, имеет вид:

$$\frac{E_K}{E_A} = (1 - c)^2 + \left(\frac{E_B}{E_A} \right) c^2 + \frac{2(E_B/E_A)c(1 - c)}{c + (E_B/E_A)(1 - c)}. \quad (8)$$

Соотношение между структурным параметром «с» и объемной долей компонента «В» устанавливается зависимостью (4).

В случае, когда $E_B/E_A = 0$ (т.е. когда место Фазы занимает пустота) для модуля Юнга пористого тела можно записать

$$(1 - c)^2 \leq \frac{E_K}{E_A} \leq \frac{1 + 2c^2 - c}{(1 - c)(1 - c)^2}.$$

Аналогичным образом можно рассчитать другие характеристики материала.

Анализ приведенных математических выражений позволяет сделать вывод о том, что помимо констант, являющихся табличными значениями физических параметров исходных материалов, закладываемых величин – веса и типа составляющих будущего псевдосплавного материала, переменной, от которой зависят все характеристики создаваемой композиции является размерный параметр «с»:

$$c = h/H,$$

где - h – характерный размер каркаса из материала «В»;

- H – длина ребра куба из материала «А».

Как следует из Рис.2, объем «В» можно выразить выражением

$$V_B = h^3 + 6h^2(H - h)\frac{1}{2}.$$

Объем «А» имеет следующий вид: $V_A = H^3$.

В случае подстановки $c = h/H$, отношение объемов

$$V_B/V_A = c^2(3 - 2c) / [1 - c^2(3 - 2c)].$$

Произведя подстановку $x = c^2(3 - 2c)$, получим

$$V_B/V_A = x / (1 - x).$$

При изготовлении композиционного материала принято обозначать его по весам составляющих компонентов, например, ВД10 – это композиция вольфрама «В» и меди «Д», в которой вес меди составляет 10% от общего

веса композиции. Если обозначить через ρ_A удельный вес меди, а через ρ_B удельный вес вольфрама, то

$$V_B/V_A = P_B \rho_A / P_A \rho_B.$$

Причем ρ_A/ρ_B является фиксированной величиной для любой группы применяемых исходных материалов. Таким образом, можно составить следующий алгоритм изготовления псевдосплавной композиции и прогнозирования и контроля ее параметров.

1. Выбор весовых количеств исходных материалов;
2. Расчет отношения удельных весов (табличные данные);
3. Расчет отношения объемов исходных материалов;
4. Определение значения параметра «с» аналитическим или графическим методом как функции от отношения объемов.

Для проведения расчета параметров конкретных псевдосплавных композиций, изготовленных на базе вольфрамового порошка с добавлением меди, построим графические изображения зависимостей:

- I. V_w/V_{Cu} от весового соотношения вольфрама и меди в псевдосплаве (Рис.4);
- II. «х» от V_w/V_{Cu} (Рис. 4);
- III. «с» от «х» (Рис.5)

Проведем расчет теплопроводности псевдосплава ВД30, в состав которого входят 30% весовых меди и 70% весовых вольфрама. Для этого сделаем следующие шаги.

1. По графику Рис.4 находим величину отношения объемов вольфрама и меди $V_w/V_{Cu} = 1,844$.

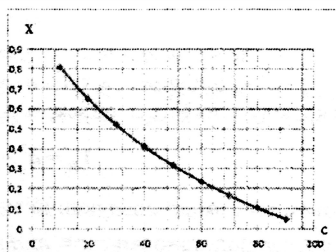
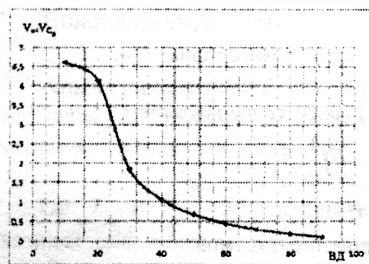


Рис.4. Графическое изображение зависимости I и II

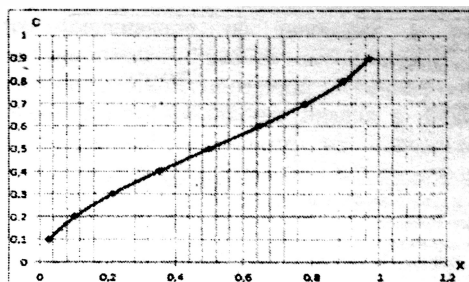


Рис. 5. Графическое изображение зависимости Π

2. По графику Рис.4 определяем величину «х», соответствующую найденному значению отношения объемов составляющих материалов $X=0.52$.

3. По графику Рис.5 находим величину параметра «с», $c=0,5$.

4. Подставляя найденное значение «с» в соответствующее выражение, находим

$$\lambda_{B/110} = 235 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}.$$

В зависимости от характеристик исходных материалов и технологических процессов изготовления псевдосплавы, получаемые методом пропитки могут иметь каркасную или матричную структуры, обеспечивающие им разные свойства. Если изготавливать псевдосплав методом жидкофазного спекания, то получится матричная структура: в легкоплавкой фазе в виде включений внедрены частицы тугоплавкой фазы.

Для получения каркасной структуры вначале спекается заготовка из тугоплавкой фазы, которая затем пропитывается расплавом легкоплавкой фазы. При этом возникает возможность изменять электрические и механические свойства материала варьируя количество и состав исходных компонентов. Если требуется получение прочного материала с большей жесткостью, следует применять каркасную структуру с сильными связями между частицами тугоплавкого материала, особенно, если предполагается использование или обработка с применением высоких температур.



Рис.6. Схема технологического процесса изготовления каркасного псевдосплава вольфрам – медь

Основными характеристиками пористого каркаса наряду с механическими свойствами являются общая пористость, наличие закрытых пор, форма поровых каналов – все, что облегчает или усложняет течение жидкого пропитывающего состава. Схема технологического процесса изготовления каркасного псевдосплава вольфрам – медь приведена на Рис.6.

Процесс является достаточно отработанным, однако в нем имеется ряд тонкостей. Первая из них – спекания вольфрамовой заготовки, которое, как правило, должно происходить при температуре на уровне 0,9 температуры плавления вольфрама. Учитывая, что эта температура превышает 3000K, наличие оборудования, способного ее обеспечить в серийном производстве псевдосплавов практически нереально. Поэтому приходится идти на технологические ухищрения, например, вводить в состав вольфрамовой шихты никель, активирующий процесс спекания и позволяющий снизить температуру до уровня 1500K. Для этого производится совместное восстановление в водороде предварительно смешанных порошков оксида вольфрама и карбоната никеля. Количество никеля в составе смеси после восстановления находится на уровне 1-5%. Считается, что при этом на каждом зерне вольфрама образуется оболочка из твердого раствора вольфрама в никеле. Взаимная растворимость никеля и меди при последующей пропитке облегчает процесс.

Однако технологически это невыгодно, поскольку требует больших затрат и применения специального оборудования у изготовителей псевдосплавов. Введение в исходную смесь никеля в таком же количестве

путем механического смешивания не приводит к положительным результатам, поскольку значительный размер частиц металлического никеля не позволяет осуществить их равномерного распределения в объеме смеси.

Кроме того, значительное количество никеля в меди приводит к снижению ее теплопроводности – одного из основных параметров псевдосплава: 5% весовых никеля в меди снижают ее теплопроводность в два раза. Поэтому нами была разработана технологическая схема, позволяющая устранить перечисленные недостатки.

Для этого путем прокаливания азотнокислого никеля в кислородосодержащей среде он переводился в окисел. Измерения показали, что активная поверхность получившегося окисла почти на порядок превышает активную поверхность карбонильного никеля, что свидетельствует о высокой дисперсности частиц окисла. Эксперименты по смешиванию полученного оксида никеля с вольфрамовым порошком и последующему спеканию брикетированных заготовок показали, что даже при добавлении 0,2% оксида обеспечивалась равномерная структура спеченного каркаса.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию основных физических параметров разработанных композиционных материалов.

Характерные результаты измерения коэффициентов теплопроводности разработанных псевдосплавных материалов ВД10, ВД20 и ВД30, а также выпускаемого серийно в настоящее время ВД30 приведены в Таблицах 1-4.

Для проведения исследований коэффициентов теплового расширения использовался dilatометр фирмы «Heraeus».

В таблице 5 приведены усредненные по большому количеству измерений данные по коэффициентам линейного термического расширения псевдосплавов ВД10, ВД15 и ВД30. На Рис.8 показаны кривые температурной зависимости КЛТР перечисленных материалов, определенные с помощью dilatометра.

Таблица 1.

Результаты измерения теплопроводности для серийного образца ВД

ВД30 (Серийно выпускаемый в настоящее время)			
Номер термопары	ЭДС, мВ	Температура, К	Разность температур, К
1	4,05	372,22	67,97
2	1,27	304,05	
3	0,97	296,72	
4	0,65	288,89	7,83
Площадь сечения образца - 0,173 см ²			

Таблица 2.

Результаты измерения теплопроводности для ВД10

ВД10			
Номер термопары	ЭДС, мВ	Температура, К	Разность температур, К
1	3,93	368,45	32,76
2	2,58	336,1	
3	2,35	330,7	10,27
4	1,93	320,4	
Площадь сечения образца - 0,117 см ²			
Теплопроводность, Вт/м·К - 140			

Таблица 3.

Результаты измерения теплопроводности для ВД20

ВД20			
Номер термопары	ЭДС, мВ	Температура, К	Разность температур, К
1	4,05	364,69	51,1
2	1,27	313,59	
3	0,97	305,52	10,51
4	0,65	295	
Площадь сечения образца - 0,173 см ²			
Теплопроводность, Вт/м·К - 182			

Таблица 4.

Результаты измерения теплопроводности для ВД30

ВД30			
Номер термопары	ЭДС, мВ	Температура, К	Разность температур, К
1	4,05	366,64	34,96
2	1,27	331,68	
3	0,97	323,37	11,73
4	0,65	311,63	
Площадь сечения образца - 0,242 см ²			
Теплопроводность, Вт/м·К -225			

На Рис.7 приведены графики экспериментально определенных и рассчитанные значения коэффициентов теплопроводности для трех типов вольфрамово-медных псевдосплавных материалов.

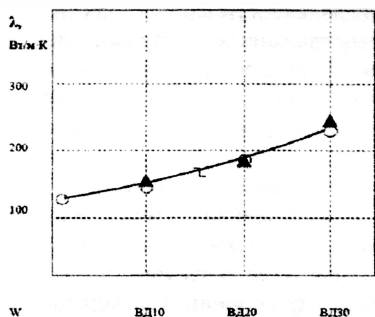


Рис. 7. Экспериментальные (окружность) и расчетные (треугольник) значения коэффициентов теплопроводности

Как следует из графиков, усредненные КЛТР в диапазоне температур от 300К до 900К соответствуют для псевдосплавов:

- ВД10 - $5,8 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$;
- ВД15 - $6,8 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$;
- ВД30 - $10 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$.

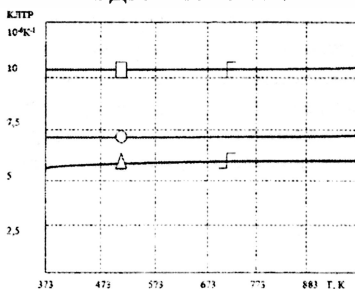


Рис. 8. Коэффициенты линейного термического расширения псевдосплавов типа ВД: треугольник – ВД10; окружность – ВД15, квадрат – ВД30. Черные точки – расчетные данные

Полученные характеристики соответствуют лучшим мировым образцам и отличаются от расчетных не более, чем на $\pm 4\%$.

Для определения эмиссионной способности разработанных композиционных вольфрамовых термоэлектродов применен метод вольтамперных характеристик (ВАХ), суть которого заключена в следующем.

По техническим требованиям амплитудное значение напряжения зажигания лампы не должно превышать 200 В. При этом величина разрядного тока аномального тлеющего разряда должна обеспечивать разогрев электрода до температуры появления термоэмиссии. В связи со

сказанным, вольтамперные характеристики, измеренные в пределах параметров питающей сети от момента зажигания тлеющего разряда до его перехода в дуговой, дают исчерпывающую информацию о пригодности того или иного материала в качестве эмиссионного.

Таким образом, при всей кажущейся исследованности как физических процессов, происходящих во время работы синтерированных электродов, так и их конструкций и технологий изготовления, до последнего времени практическая реализация не была осуществлена. При этом следует особо отметить, что со времени публикации основных результатов в этом направлении прошло около 30 лет.

Существующая ситуация объясняется основными причинами – высокой сложностью и дороговизной предложенных технологий изготовления композиционных электродов, а также нежеланием производителей ламп вкладывать значительные средства в закупку нового технологического оборудования и изменение традиционных хорошо отработанных технологических переходов.

Проведенный анализ предложенных ранее конструкций электродов и технологий изготовления подтвердил как экономическую неэффективность их использования, так и перспективность использования эффекта полого катода именно в условиях дугового разряда низкого давления. Поэтому был разработан композиционный электрод, схематическое изображение которого приведено на Рис. 9. Разработанный электрод представляет собой керн 1 из тугоплавкого материала, тугоплавкого материала, на котором закреплены две спеченные части, выполненные в виде шаровых сегментов, радиусные поверхности которых направлены навстречу друг другу. Спеченные части представляют собой вольфрамовые губчатые матрицы, поры в которых заполнены эмиссионным веществом, имеющим в своем составе карбонаты бария-стронция-кальция.

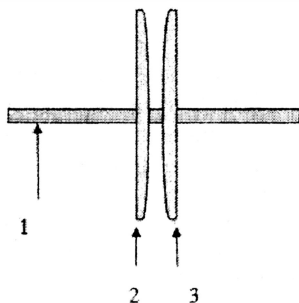


Рис. 9. Схематическое изображение композиционного электрода.

1 – керн, 2 и 3 – спеченные части

Переменное расстояние между внутренними поверхностями позволяет поддерживать эффект полого катода в условиях естественного изменения

давления наполняющего разрядный объем газа в течение срока эксплуатации лампы.

Заключение

Выполненная работа «Физико-технические основы создания композиционных материалов на базе промышленных порошков вольфрама» открыта новый путь в совершенствовании материалов каркасного типа, получаемых как на основе спеченных вольфрамовых пористых матриц, пропитываемых легкоплавкими материалами и тугоплавкими наночастицами, так и композиционных прессованных изделий, формируемых одновременно из многокомпонентной шихты.

Отличительной особенностью такого направления является то, что предложенные физико-технические основы позволяют получать композиционные материалы и изделия из них с физическими параметрами, максимально близкими и теоретически возможным, как по эмиссионным, так и по теплопроводности, причем в качестве исходного сырья применены промышленные порошки и другие исходные материалы. Это дает возможность создавать и производить композиционные материалы и изделия с высокими параметрами, пока не достигнутыми зарубежными фирмами, в том числе и по долговечности. Разработанные физико-технические основы могут быть применены и для совершенствования и разработки технологий других классов материалов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Разработаны физико-технические основы создания композиционных материалов на основе порошков вольфрама с высоко теплопроводностью и эмиссионными свойствами, при этом:

1. Разработаны требования к исходным материалам для исследуемых вольфрамовых композиций и оптимальные способы приготовления исходных составов.

2. Разработаны новые аналитические подходы к прогнозированию и оперативному контролю параметров вольфрамово-медных псевдосплавных материалов.

3. Показана возможность определения физических параметров псевдосплавов каркасного строения, изготовленных на базе вольфрамовых порошков, основанная только на информации об удельном весе материала.

4. Разработана методика нахождения параметров разработанных вольфрамово-медных псевдосплавов по известной плотности.

5. Определены общие требования к основным процессам изготовления вольфрамовых композиционных материалов: прессованию заготовок, спеканию и пропитке.

6. Разработанные базовая конструкция композиционного электрода на базе вольфрамового каркаса и технология его изготовления позволяют легко изменять размеры электрода и его отдельных частей, пористость вольфрамовой матрицы и, соответственно, теплоемкость и теплопроводность спеченной части;

7. Изготовлены по разработанным режимам псевдосплавы материалы типа ВД и термоэмиссионные электроды.

8. Проведены экспериментальные исследования параметров теплопроводности коэффициентов линейного термического расширения. Определено, что расчетные и экспериментальные данные отличаются не более, чем на 4%. Полученные характеристики разработанных псевдосплавов достигают величины 0,95 от теоретически достижимых.

9. Создан алгоритм расчета модуля Юнга для установления связи модуля упругости композиционного материала с каркасной его структурой, это позволяет моделировать разработку новых материалов с заданными физическими параметрами.

Основные результаты диссертации отражены в работах:

1. Пью Мьинт Вей. Синтерированный электрод для люминесцентной лампы // Научноёмкие технологии. 2014. Т. 15, №10. С. 31-36 (0,38/0,38 п.л.).

2. Ньейн Чан, Пью Мьинт Вей. Применение метода Монте-Карло для вычисления кратных интегралов при имитационном моделировании // Научное обозрение. 2013. № 9. С. 114-116 (0,2/0,1 п.л.).

3. Пью Мьинт Вей, Ньейн Чан. Фазовый переход обобщенной ферромагнитной модели Поттса - эффективность невидимых состояний // Научное обозрение. 2014. № 4. С. 63-66 (0,3/0,2 п.л.).

4. Пью Мьинт Вей, Прасицкий Г.В. Разработка способа изготовления вольфрамо-медного псевдосплава // Научноёмкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2014. Т. 3. С. 132-133 (0,13/0,1 п.л.).

5. Пью Мьинт Вей, Мазин А.В. Разработка алгоритм расчета Модуля Юнга Вольфрамово-Медных псевдосплавов // Научноёмкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2014. Т. 3. С. 127-131 (0,31/0,16 п.л.).

6. Ньейн Чан, Пью Мьинт Вей. Анализ намагничивания материала на основе модели Изинга // Студенческая Научная Весна – 2012: Материалы региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. М., 2012. Т. 2. С. 269-274 (0,38/0,2 п.л.).

7. Пью Мьинт Вей, Ньейн Чан. Фазовые переходы в двумерной антиферромагнитной модели Поттса на треугольной решетке // Научноёмкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2012. Т. 3. С. 22-24 (0,2/0,1 п.л.).

8. Пью Мьинт Вей, Ньейн Чан. Анализ фазовых переходов и критических явлений на основе модели Поттса // Научноёмкие

