

УДК 533.9.07

А.В. ЛОЯН, Н.Н. КОШЕЛЕВ, Е.П. СОЛОНИНКО, Е.Г. АГЕЕВА

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ W-Ba-Sc ЭМИТТЕРОВ КАТОДОВ ЭРД**

*В работе представлены результаты предварительных испытаний W-Ba-Sc эмиттеров катодов ЭРД, которые изготовлены по разработанной авторами технологии высокотемпературной пропитки вольфрама скандатом бария с доказанным ресурсом более 30000 час при рабочей плотности тока около 100 А/см<sup>2</sup>. Описано устройство для испытания эмиттеров, а также стендовое оборудование, используемое в эксперименте. Представлена система электропитания и измерительный комплекс. Проведенные исследования определили диапазон рабочих температур, плотностей токов и напряженности поля в которых работают данные эмиттеры.*

*Ключевые слова:* эмиттер, катод, эмиссионная поверхность, работа выхода.

**Введение**

Одним из наиболее важных направлений развития науки и техники в настоящее время является направление электрореактивных двигателей. Сочетая в себе уже имеющиеся знания в области материаловедения, физики плазмы, взаимодействия плазмы с поверхностью и др., это направление определяет и тенденции развития смежных областей знаний.

Например, в катодах электрореактивных двигателях широко используются материалы обладающие высокими эмиссионными свойствами. Так в разработках ОКБ «Факел», Россия применяются эмиттеры изготовленные из гексаборида лантана. Такие катоды показывают высокие эксплуатационные свойства и длительный, до 10000 час., ресурс. В аналогичных устройствах производства JPL, USA применяются импрегнированные W-Ba эмиттеры. По сообщениям катоды с такими эмиттерами обладают ресурсом до 20000 час. и более. Все эти материалы ранее или позднее использовались в технике электронно-вакуумных приборов и при незначительной модернизации были адаптированы в катодах ЭРД. Основной характеристикой эмиттеров (кроме ресурса) является рабочая плотность тока при номинальном токоотборе. Для первых это 5...7 А/см<sup>2</sup>, для вторых 5...10 А/см<sup>2</sup>. Однако такие низкие плотности тока ограничивают возможности снижения габаритных размеров и веса катодов ЭРД, а большая теплонапряженность внутрикатодных деталей и узлов заставляет конструкторов применять очень дорогостоящие материалы с высокой температурой рекристаллизации.

Уже длительное время в ХАИ ведутся работы по совершенствованию катодов [1 – 3]. Одним из

направлений этой деятельности есть разработка новых эмиссионных материалов. Результаты применения таковых обсуждаются в [4, 5]. Где показано, что применение эмиттеров импрегнированных скандатом бария может снизить вес штатных катодов типа КЭ-5 более чем в 50 раз, а доказанный ресурс в аналогичных катодным условиям на сегодняшний день превышает 30000 часов без изменения эмиссионных свойств.

Известно, что существуют эмиттеры пропитанные составом  $2,4\text{BaO} \cdot 0,6\text{CaO} \cdot 0,1 \text{Sc}_2\text{O}_3 \cdot 0,9\text{Al}_2\text{O}_3$ , которые выдают плотность тока 15-20 А/см<sup>2</sup> при рабочей температуре 900 – 1000 °С [6]. Наилучшие образцы эмиттеров подобного состава выдают плотность тока до 460 А/см<sup>2</sup> при  $T = 1030 \text{ }^\circ\text{C}$  [7]. Считается, что столь существенное увеличение эффективности эмиттера происходит при образовании на окислах скандия эмиссионных центров и увеличение эмиссии за счет ее автоэмиссионной части [8].

В то же время полностью отсутствуют данные по исследованиям эмиттеров получаемых пропиткой W матрицы чистым скандатом бария состава  $\text{Ba}_3\text{Sc}_4\text{O}_9$ . По мнению авторов, это обусловлено очень высокой температурой плавления активной компоненты (около 2400 °С) и соответственно возникновению технологических проблем при изготовлении такого эмиттера. Эти трудности были преодолены. Авторами статьи была разработана технология, которая позволяет обеспечить быстрый нагрев, пропитку и охлаждение пористой W матрицы скандатом бария состава  $\text{Ba}_3\text{Sc}_4\text{O}_9$ . Как было указано ранее, такие эмиттеры длительное время успешно применяются нами при разработке катодов ЭРД нового поколения.

Однако эмиссионные свойства таких эмиттеров изучены не достаточно, не проведена оптимизация

состава пропитки. Эта статья является первой публикацией призванной закрыть данный пробел.

### 1. Стендовое оборудование

Стенд для испытания эмиттеров катодов ЭРД состоит из вакуумной системы, системы электропитания, измерительной системы, ПО обработки полученных результатов.

Вакуумная система состоит из следующих основных элементов: камеры 1, форвакуумного 10, диффузионного 7 и магниторазрядного насосов 9, приборов измерения вакуума 4, 5, 6 и клапанов 2, 3. ПГС схема и фотография стенда представлены на рис. 1.1 и 1.2.

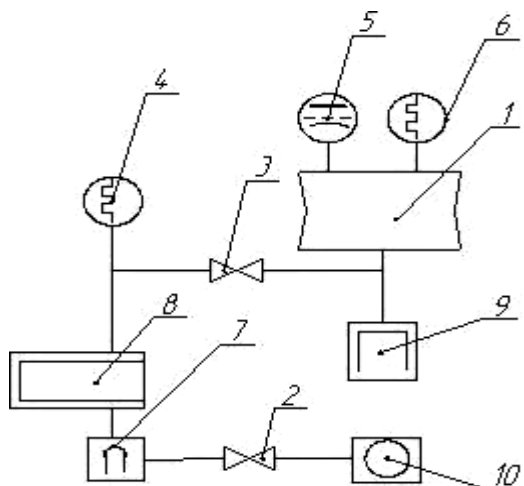


Рис.1.1. ПГС схема испытательного стенда



Рис.1.2. Фото испытательного стенда

Вакуумная камера имеет объем около 10 л и изготовлена из нержавеющей стали. Для измерения температуры образца пирометром имеется смотровое окно, изготовленное из лейкоапфира. Для уменьшения времени обезгаживания, камера оснащена системой прогрева с максимальной темпера-

турой до 350 °С.

Для предварительной откачки объема вакуумной камеры используется вакуумный насос 2НВР5ДМ производительностью 5 л/с, который обеспечивает вакуум  $7...8 \cdot 10^{-5}$  мм. рт. ст. Для высоковакуумной откачки используется диффузионный насос производительностью 100 л/с. Этот насос откачивает камеру до давления  $5 \cdot 10^{-6}$  мм. рт. ст. Для обеспечения сверхвысокого вакуума  $1 \cdot 10^{-9}$  мм. рт. ст. имеется магниторазрядный насос «НМД-0,4-1». Время выхода установки в режим начала экспериментов не превышает 4 часа.

Устройство для испытания эмиттеров (рис. 1.3) состоит из нагревательного элемента 6, который крепится к трем молибденовым ножкам 5, эмиттера 1, расположенного над нагревателем, который крепится тремя стержнями 4 изготовленными из молибдена, анодного блока 2 – расположенного над эмиттером в специальном креплении 3 (из Мо) и керамических колец 8, 9, 10, выполняющих роль изоляторов, соединяемых между собой металлическими шпильками 7. Стержни, соединяющие керамическую основу катодного и анодного блоков, изготовлены из молибдена. Благодаря этому величина зазора между диафрагмой анода и эмиттером остается неизменной в процессе нагрева образца до различных температур.

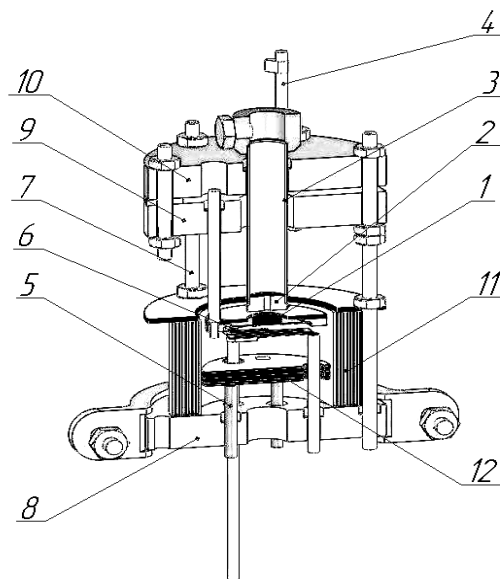


Рис. 1.3. Устройство для испытаний эмиттеров

Между нагревателем и керамической шайбой предусмотрен блок торцевых экранов (12). На керамической основе также расположены экраны (11), способствующие снижению тепловых потерь, а также уменьшению теплового потока на остальные элементы конструкции. На рис.1.4. более детально показана схема конструкция катодно-анодного узла.

Для обеспечения высоких рабочих температур нагревательный элемент изготавливался из тантала толщиной 0,1 мм. Для ограничения площади эмиссионной поверхности катода, в оправке изготавливалось отверстие диаметром 0,2 мм. Крепление оправки к опорной пластине осуществлялось точечной сваркой. Все указанные детали изготавливались из ниобия НБ1 толщиной 0,1 мм методом штамповки с промежуточным отжигом. Расстояние от поверхности эмиттера до массивного анода выполненного из вольфрама марки ВА составляет 1 мм.

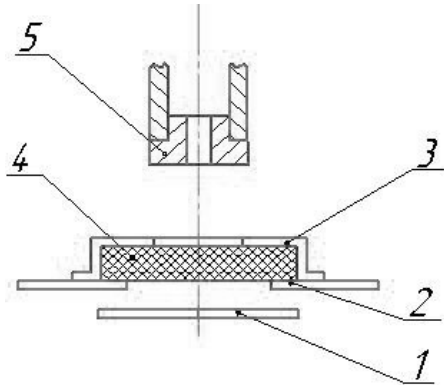


Рис. 1.4. Схема крепления образца эмиссионного материала:  
1 – нагревательный элемент, 2 – пластина опорная,  
3 – оправка, 4 – исследуемый образец, 5 – анод

На рис.1.5. представлен график зависимости температуры нагревателя от подаваемой на него мощности.

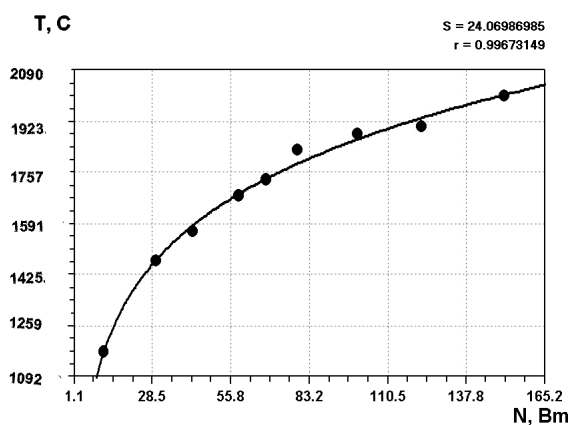


Рис. 1.5. Зависимость температуры нагревателя от подаваемой на него мощности

Очевидно, что рабочие температуры нагревателя не превышают допустимую температуру (до 2200 °C) для Та при мощностях накала до 180 Вт. Как показали дальнейшие исследования, такой мощности достаточно для прогрева образца до температур 1700 К. Этого достаточно для проведения исследований эмиттеров катодов ЭРД.

## 2. Система электропитания и измерения

Система электропитания должна обеспечить необходимые величины тока и напряжения для питания всех элементов вакуумной системы и катодно-нагревательного узла. Она (рис. 2.1) состоит из источника питания нагревательного элемента катодно-нагревательного узла 8, импульсного источника питания разрядного промежутка, который в свою очередь делится на устройство управления импульса 13, регулятор напряжения 12 и блок питания разряда 11, источника питания системы прогрева вакуумной камеры 6, источников питания насосов.

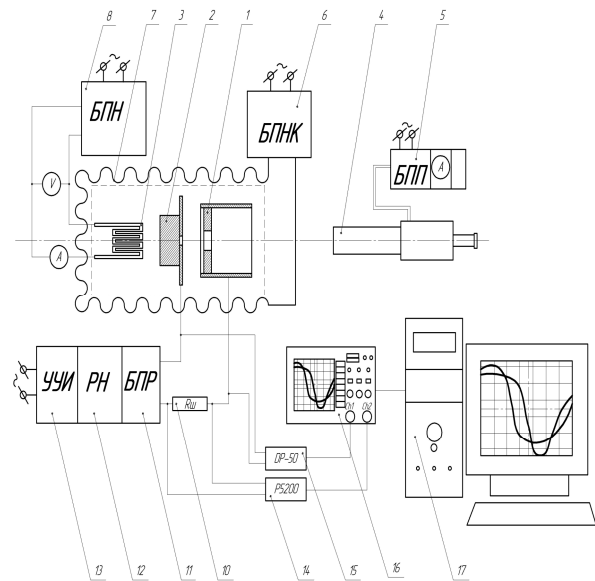


Рис. 2.1.Схема системы электропитания и измерения:

1 – анод, 2 – катод, 3 – нагреватель, 4 – пирометр, 5 – блок питания пирометра с амперметром, 6 – блок питания нагрева камеры, 7 – нагреватель камеры, 8 – блок питания нагревателя, 9 – измерительный шунт, 10 – блок питания разряда, 11 – регулятор напряжения, 12 – устройство управления импульса, 13 – делитель для измерения тока, 14 – делитель для измерения напряжения, 15 – цифровой осциллограф, 16 – ЭВМ

Импульсный источник питания разрядного промежутка используется потому, что при постоянной нагрузке разрядного промежутка анод разогревается за счет электронного нагрева, что приводит к выходу из строя устройства.

Импульсный источник питания обеспечивает полуволну с максимальным напряжением до 7 кВ. Источник питания нагревательного элемента питает нагреватель постоянным, высокостабилизированным током до 15 А. Мощность источника 200 Вт.

В состав измерительной аппаратуры входит пирометр 4 со своей собственной системой электропитания 5 и амперметром для определения показаний

ний пирометра, осциллограф 16 с дифференциальными щупами 14, 15. Щупы дают возможность измерять показания при напряжении до 6,5 кВ.

### 3. Методика обработки

После измерения импульса напряжения и тока, данные передавались на ЭВМ, где были построены соответствующие зависимости плотности тока от напряжения на диодном промежутке при различных температурах эмиттера. Семейство кривых для различных температур показано на рис. 3.1. На рис. 3.2 представлены те же кривые только в координатах  $\lg(j) = f(E^{1/2})$ .

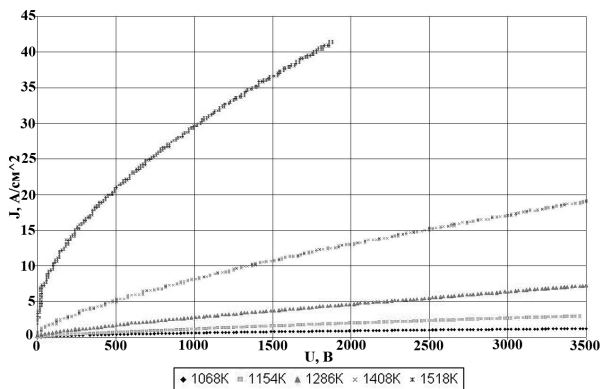


Рис. 3.1. Зависимость плотности тока от напряжения диодного промежутка

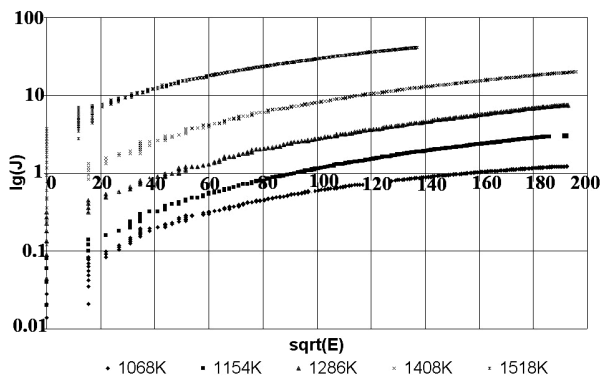


Рис. 3.2. Зависимость плотности тока от напряженности электрического поля в координатах  $\lg(j) = f(E^{1/2})$

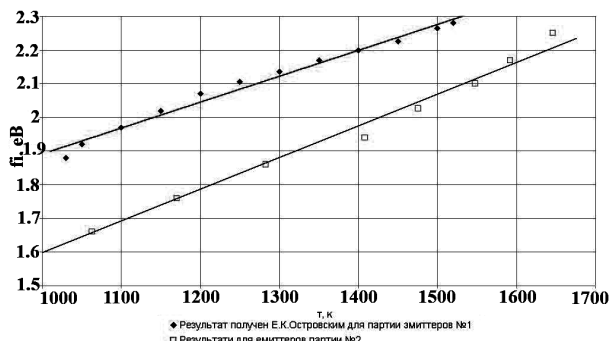


Рис. 3.3. Зависимость работы выхода от температуры эмиттера

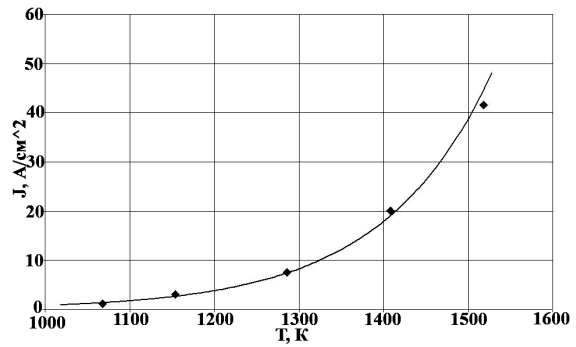


Рис. 3.4. Зависимость плотности тока от температуры эмиттера

Для дальнейшей обработки результатов использовалась методика подробно описанная в [1]. На рис. 3.3. и 3.4. представлены результаты расчета работы выхода и максимальной плотности тока от температуры эмиттера (для условий аналогичных работе эмиттера в катодах ЭРД).

### Выводы

1. Разработана технология сверхвысокотемпературной пропитки W матрицы скандатом бария состава  $Ba_3Sc_4O_9$ .
2. С помощью разработанной технологии изготовлены эмиттеры катодов ЭРД с доказанным ресурсом более 30000 час при рабочей плотности тока около  $100 \text{ A/cm}^2$ .
3. Создана стендовая база для исследований высокоэмиссионных материалов катодов ЭРД.
4. Проведенные исследования показывают, что созданные эмиттеры могут работать при плотностях тока  $150 \text{ A/cm}^2$  при температуре 1600 К и напряженности поля до  $20 \text{ kV/cm}$ .

Дальнейшие работы будут направлены на изучение взаимосвязи структуры поверхности материала и его эмиссионных свойств.

Авторы с благодарностью отмечают плодотворные дискуссии с А.П. Кислициным и Е.К. Островским.

Работа выполнена в рамках бюджетной темы НАКУ "ХАИ".

### Литература

1. Захарченко А.В. Прогнозирование ресурсных характеристик полых катодов / А.В. Захарченко, С.Ю. Нестеренко, А.И. Оранский // *Авиационно-космическая техника и технология: тр. Харьковско-го авиац. ин-та им. Н.Е. Жуковского (1996)*. – Х.: ХАИ, 1997. – С. 239-244.
2. Оранский А.И. Перспективные катоды электроракетных двигателей / А.И. Оранский // *Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч.*

праць. – Х.: НАКУ «ХАІ», 2002. – Вип. 31. Двигуни та енергоустановки. – С. 257-259.

3. Кошелев Н.Н. Моделирование стартового нагрева безнакального катода-компенсатора для микро СПД / Н.Н. Кошелев, А.И. Цаглов, В.А. Федотенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 8. – С. 116-120.

4. Koshelev N.N. Investigation of Hollow Cathode for Low Power Hall Effect Thruster / N.N. Koshelev., A.V. Loyan // *Presented at the 30<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy September 17-20, 2007*.

5. Малогабаритный катод для ЭРД / Н.Н. Кошелев, А.В. Лоян, О.П. Рибалов, Е.И. Ищенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 8. – С. 164-166.

6. Влияние фазового состава барий-кальциевых алюмоскандатов на эмиссионные характеристики импрегнированных катодов / О.И. Гетьман, С.П. Ракитин, В.В. Паничкина, З.П. Рудь // *Порошковая металлургия*. – 2000. – № 11/12. – С. 75-82.

7. Supply and loss mechanism of Ba dispenser cathodes / G. Gartner, P. Geittner, D. Raasch, D.U. Wiechert // *Appl. Surf. Sci.* – 1999. – Vol. 146. – P. 22-30.

8. Вивчення механізму емісії високострумівимпрегнованих скандатних катодів / С.П. Ракітін, В.В. Панічкіна, О.І. Гетьман, В.В. Ільченко, О.Є. Лушкін, І.І. Бех. – *Проект ДФФД: № 04.07/00026*.

Поступила в редакцію 26.04.2010

**Рецензент:** д-р тех. наук, проф. кафедри двигателів і енергоустановок летательных аппаратов А.И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### ПОПЕРЕДНІ ВИПРОБУВАННЯ W-Ba-Sc ЕМІТЕРІВ КАТОДІВ ЕРР

*А.В. Лоян, М.М. Кошелев, Є.П. Солонинко, К.Г. Агеева*

В роботі представлені результати попередніх випробувань емітерів катодів ЕРР, які виготовлені по розробленій технології високотемпературного пропитування вольфраму скандатом барію з доведеним ресурсом більше 30000 годину при робочій щільності струму близько 100 А/см<sup>2</sup>. Описаний прилад для випробування емітерів, а також стендове обладнання, що використовується в експерименті. Представлена система електроживлення та вимірювальний комплекс. Проведені дослідження визначили діапазон робочих температур, густин струмів і напруженості полів в яких працюють дані емітери.

**Ключові слова:** емітер, катод, емісійна поверхня, робота виходу.

### PRELIMINARY TESTING OF W-Ba-Sc EMITTERS OF EPT CATHODES

*A.V. Loyan, N.N. Koshelev, Ye.P. Solonynko, E.G. Ageeva*

The work presents results of preliminary testing of emitters of EPT cathodes which were made by the developed technology of high-temperature impregnation tungsten with BaSc with a proven resource of more than 30000 hours at an operating current density of about 100 A/cm<sup>2</sup>. Device for emitter testing, and test-bed equipment which were used in experiment were described. Power-supply system and measuring equipment are presented. Studies have identified a range of operating temperatures, current densities and field strength in which employing these emitters.

**Key words:** emitter, cathode, emission surface, work function.

**Лоян Андрей Витальевич** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.loyan@khai.edu.

**Кошелев Николай Николаевич** – старший научный сотрудник кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Солонинко Евгений Павлович** – инженер кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: SolonynkoYevgen@gmail.com.

**Агеева Екатерина Геннадьевна** – студентка кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.