

УДК 621.385.032

А.В. ЛОЯН, М.Ю. ТИТОВ, Е.П. СОЛОНИНКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

РАСЧЕТНЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОПОРИСТЫХ ЭМИТТЕРОВ КАТОДОВ ЭРД

В работе представлен способ численного расчета эффективной теплопроводности металлопористых эмиссионных материалов на примере вольфрам-гафнат-бариевого эмиттера ($W-BaHfO_3$). Расчет теплопроводности осуществляется с использованием конечно-элементного моделирования в ANSYS 11. Описан способ создания геометрической модели КЭМ по фотографиям эмиттера методом их оцифровки. По рассчитанному в ANSYS тепловому потоку и заданным температурам границ была рассчитана эффективная теплопроводность исследуемого эмиттера в диапазоне температур 300...2000 К. Обнаружено увеличение эффективной теплопроводности эмиттера при температурах выше 700 К.

Ключевые слова: теплопроводность, эмиттер, вольфрамовая матрица, активное вещество.

Введение

На этапе разработки катодов электроракетных двигателей, проводится оптимизация тепловой схемы конструкции, целью которой является снижение температуры в критических местах катода (обеспечение герметичности и прочности спаев металла и керамики), а так же обеспечение допустимой рабочей температуры материалов. При этом необходимо сохранить достаточно высокую температуру эмиттера. Оптимизация тепловых схем конструкций катодов проводится в программном комплексе конечно-элементного моделирования ANSYS [1].

Распределение температур в конструкции катода определяется теплофизическими свойствами материалов из которых изготовлен катод. Так, например, теплопроводность эмиттера, как основного теплопринимающего элемента [2], будет определять теплоотвод в конструкцию, поэтому эту характеристику важно знать. Если для вольфрама, молибдена, кобальта, керамики тепловые свойства хорошо известны [3], то подобная информация по эмиссионным материалам, используемым в катодах ХАИ, практически отсутствует, и при расчетах, соответственно, возникают неопределенности.

Эффективная теплопроводность пористых материалов является предметом исследования уже достаточно давно. Существует множество теоретических решений позволяющих с некоторой точностью определять эффективную теплопроводность [4]. Все они являются идеализированными и часто не повторяют реальную структуру материала. Как правило, это упорядоченные и правильной формы фракции (круг, квадрат, овал). Если авторы и предлагают модели, в которых максимально возможно учитывается структура, все физические процессы, то содер-

жащиеся уравнения являются очень громоздкими, сложными и трудно решаемыми.

В связи с появлением современных комплексов конечно-элементного анализа (КЭМ) возможным стало гораздо быстрее и качественнее производить подобные расчеты. Один из способов и предлагается в настоящей работе.

1. Образец металлопористого эмиттера

Разрабатываемые в МНТЦ КЭД «ХАИ» катоды основаны на металлопористых эмиттерах, представляющих собой прессованные вольфрамовые матрицы, заполненные активной компонентой, например $W-BaHfO_3$.

Исследуемый в работе образец $W-BaHfO_3$ эмиттер получен в результате прессования с последующим спеканием в вакууме. Исследуемый образец в массовом соотношении содержит 70 % вольфрама и 30% $BaHfO_3$. Расчетная пористость эмиттера составляет 16 %. Фотографии образца эмиттера представлены на рис. 1, 2.

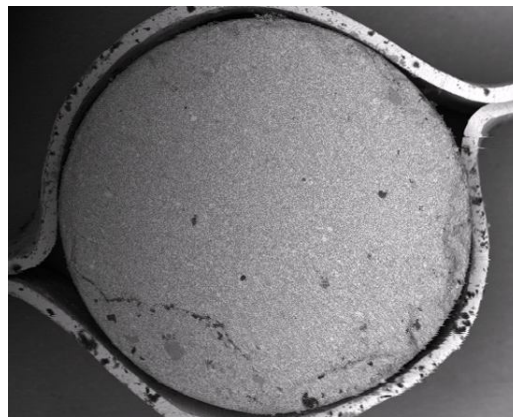


Рис. 1. Фотография образца эмиттера (М 40:1)

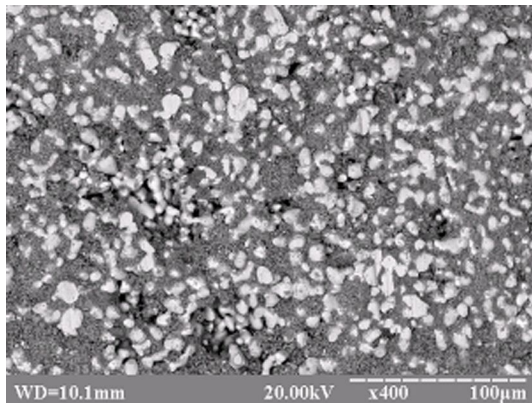


Рис. 2. Фотография образца эмиттера в отраженных электронах в масштабе 400:1 (белый цвет – вольфрам, серый – BaHfO₃, черный – поры)

2. Выбор расчетной области

Задача исследования эффективной теплопроводности металлопористого эмиттера двигателя решалась в двухмерном виде путем «оцифровки» фотографии реальной структуры материала.

Очевидно, что чем больше рассматриваемая модельная структура, тем больше расчетные данные по эффективной теплопроводности будут соответствовать экспериментальным результатам. С другой стороны увеличение области исследования приводит к увеличению временных затрат на создание КЭМ, а так же расчетного времени. Поэтому была выбрана сравнительно небольшая область повторяющая структуру исследуемого образца эмиттера (типичная структура). «Типичная» области выбиралась следующим образом. С помощью графического редактора Adobe Photoshop было определено количественное соотношение черного, серого и белого цветов для области с размерами 400x225 µm. Для исключения переходных цветов фотография была разбита на 3 цвета с равной оптической плотностью (процесс постеризации). При этом соотношение цветов было получено следующее – 1:4,3:2 (*) для черного, серого и белого цветов соответственно. Площадь, залитая черным цветом (поры), составила ~ 14% от всей площади фотографии, что достаточно хорошо согласовывается с расчетной пористостью исследуемого материала (16%).

Далее был выбран небольшой (80x60 µm) участок поверхности, повторяющий полученное соотношение (*). На рис. 3 – 5 представлен пошаговый путь от фотографии в отраженных электронах «типичного» участка металлопористого эмиттера к геометрической модели КЭМ.

После постеризации остается большое количество пор и фракций, размером в несколько микрон (см. рис. 4), которые были объединены в более крупные объекты (см. рис. 5).

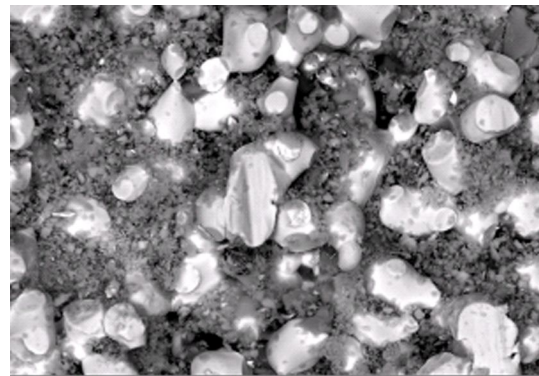


Рис. 3. Фотография «типичной» структуры эмиттера

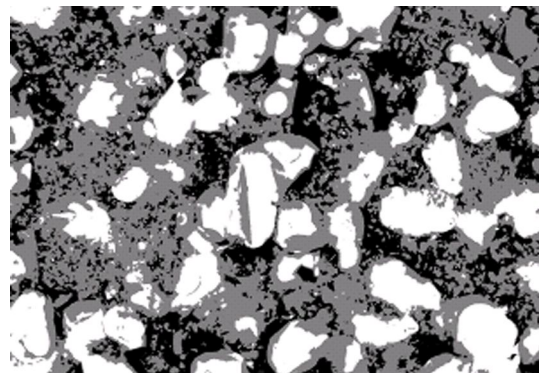


Рис. 4. Фотография «типичной» структуры после постеризации

3. Численная модель

Для определения эффективной теплопроводности металлопористого эмиттера была предложена следующая численная модель (рис. 5). Размеры LxV=80x60 µm. Принято, что стенка с температурой T₁ является холодной, а с T₂ – горячей.

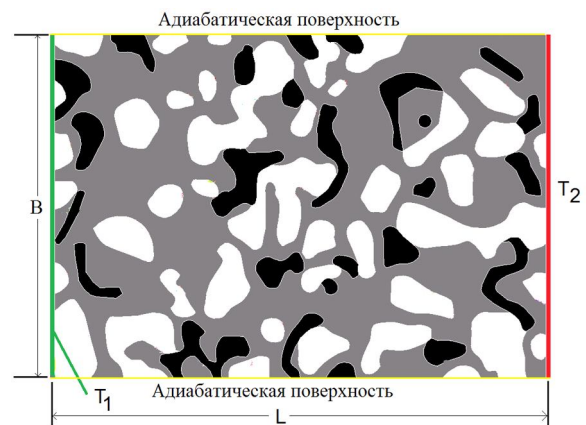


Рис. 5. Геометрическая модель КЭМ (эмиттер)

В качестве тепловых свойств вольфрама и пропитки BaHfO₃ были заданы зависимости коэффициентов теплопроводности λ от температуры (рис. 6) [5, 6]. В модели учитывается теплообмен излучени-

ем в порах, поэтому для вольфрама и пропитки были заданы так же степени черноты - 0,6 и 0,5 соответственно.

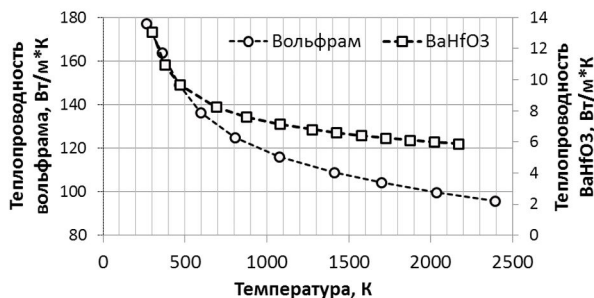


Рис. 6. Зависимость теплопроводности вольфрама и ВаНfO₃ от температуры

Модель была разбита плоскими четырехугольными конечными элементами. Степень разбиения модели была определена несколькими пробными численными экспериментами. С одной стороны была обеспечена необходимая точность вычисления, с другой – уменьшено влияние накопления возможных расчетных ошибок.

В модели решается нестационарное уравнение теплопроводности с заданным начальным распределением температуры и стационарными граничными условиями.

В качестве граничных условий заданы температуры T1 (холодная стенка) и T2 (горячая стенка), при этом теплообмен с окружающей средой через верхнюю и нижнюю стенки отсутствует (рис. 5).

4. Уточнение численной модели

Для модели был проведен поиск оптимального количества узлов N. Критерием при этом являлась сходимость тепловых потоков на границах T1 и T2 – тепловой поток с холодной поверхности T1 должен быть равен тепловому потоку на горячую поверхность T2. Показано (рис. 7), что при увеличении N узлов выше 40000 шт. разница ΔQ не превышает 1%, минимальный характерный размер ячейки при этом составлял 0,35 мкм.

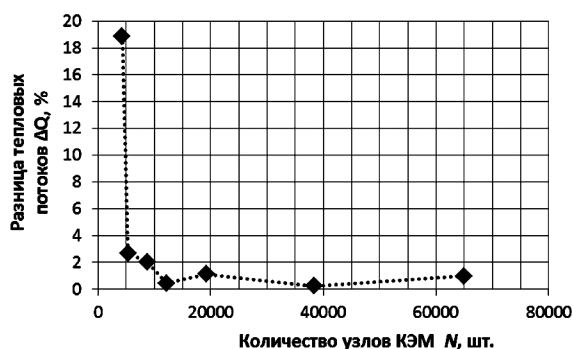


Рис. 7. Зависимость ΔQ от количества узлов

Поскольку результатом расчета является тепловой поток в каждом узле КЭМ, и в частности в узлах границ T1 и T2, то для расчета эффективной теплопроводности необходимо было вычислить интегральный тепловой поток Q через всю границу.

В системе ANSYS вывод результатов происходит в виде распределения величины вдоль линии с заданной дискретностью. Поэтому целесообразным являлось определение достаточного разбиения для обеспечения заданной точности интегрального теплового потока. На рис. 8 видно, что увеличение точек на границе эмиттера выше 200 шт. не приводит дальнейшему изменению интегрального потока Q более чем на 1%. Расчет приращения ΔQ_p осуществлялся по следующей формуле:

$$\Delta Q_p = \left| 100 - \frac{Q_{i-1}}{Q_i} * 100\% \right|, \quad (1)$$

где Q_i – интегральный тепловой поток при заданном количестве точек на границе N_{point}_i.

Интегральный тепловой поток определялся с помощью системы компьютерной алгебры Mathcad по известному алгоритму [7].

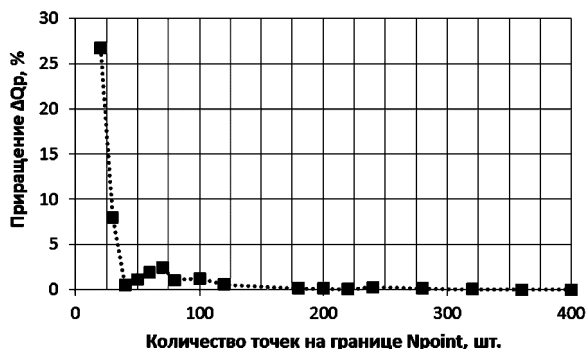


Рис. 8. Зависимость приращения ΔQ_p от количества точек на стенках эмиттера

5. Результаты расчетов

Эффективная теплопроводность эмиттера была рассчитана для диапазона температур 300...2200 К с шагом в 100 К. При этом принималось, что для λ_{EFFi} температуры стенок T1_i = T₁ – ΔT и T2_i = T₁ + ΔT. Во всем диапазоне температур ΔT=50 К.

$$\lambda_{EFF} = \frac{Q/S}{T_1 - T_2/L} = \frac{Q/B \cdot 1}{T_1 - T_2/L}, \quad (2)$$

где S – сечение через которое проходит поток (м²); поскольку решается плоская задача, то сечение S равно произведению B и единицы;

L, B – длина и ширина образца эмиттера (м).

На рис. 9 представлены результаты расчета эффективной теплопроводности. Вид зависимости эффективной теплопроводности от температуры не повторяет поведение теплопроводностей вольфрама

и гафнат-бария (см. рис. 6), а имеет явно выраженный экстремум. При температуре 700 К вид зависимости λ_{EFF} меняется с монотонно убывающей на возрастающую функцию. Подобный эффект увеличения теплопроводности эмиттера может быть объяснен увеличением теплопередачи излучением. Вначале при увеличении температуры эффективная теплопроводность эмиттера уменьшается одновременно с уменьшением теплопроводности исходных компонентов эмиттера. Однако при температуре 700 К становится заметным вклад лучистого теплообмена внутри пор и тем самым компенсируется уменьшение теплопроводности вольфрама и гафнат-бария.

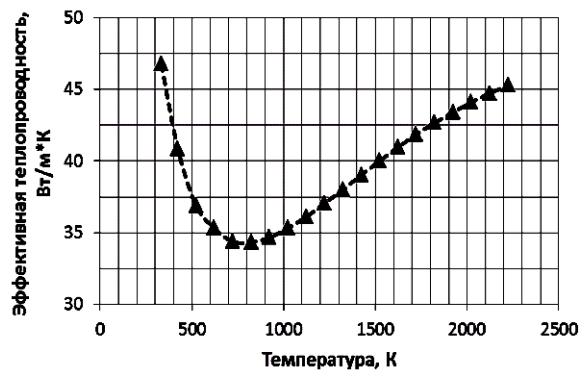


Рис. 9. Зависимость эффективной теплопроводности эмиттера от температуры

Вклад лучистого теплообмена был оценен следующим образом: эффективная теплопроводность эмиттера была представлена суммой лучистой теплопроводности λ_{RAD} и теплопроводности твердой фазы λ_{FAZ} :

$$\lambda_{\text{EFF}} = \lambda_{\text{FAZ}} + \lambda_{\text{RAD}} \quad (3)$$

где λ_{FAZ} была рассчитана аналогично λ_{EFF} по формуле (2), но без учета теплообмена в порах.

Выразив λ_{RAD} в процентном соотношении от λ_{EFF} , был получен график, представленный на рис. 10. Видно, что при увеличении температуры увеличивается доля лучистой теплопередачи и при значительных температурах (более 2000 К) может достигать 50 % от эффективной теплопроводности эмиттера. Стоит сделать акцент на том, что при увеличении температуры уменьшается теплопроводность твердой фазы, в противном случае вклад λ_{RAD} был бы меньше и отличался бы вид кривой (рис 10).

Выводы

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. При увеличении температуры до 700 К эффективная теплопроводность металлпористого эмиттера уменьшается, свыше 700К - увеличивается.

2. При увеличении температуры увеличивается лучистая теплопередача в порах и вклад излучения в эффективную теплопроводность может составлять до 50%.

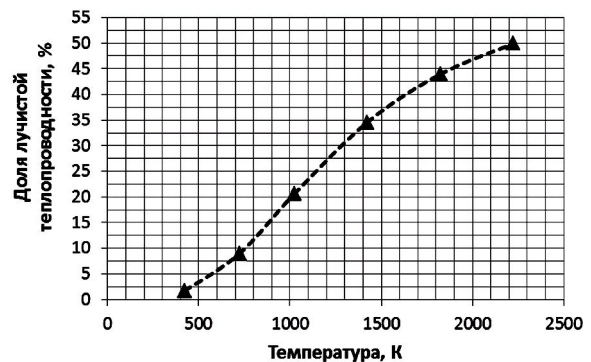


Рис. 10. Вклад радиационной теплопередачи в эффективную теплопроводность эмиттера

Перспективы дальнейших исследований

Тепловой расчет металлпористого эмиттера был выполнен с рядом упрощений и допущений. Так, не принималось во внимание изменение структуры эмиттера при его нагреве, влияние рабочей среды (ксенона) эмиттера, конвективный теплообмен в порах. Отсутствие достоверной информации по коэффициентам излучения компонентов материала эмиттера так же вносит неопределенности при расчетах. Поэтому в дальнейшем планируется учесть эти эффекты и провести экспериментальные работы.

Интересным также является определение влияния пористости, композитного состава, размеров фракций на эффективную теплопроводность эмиттеров на основе гафнат- и скандат-бариевых активных добавок.

Благодарности

Авторы выражают благодарности Н.Н. Кошелеву и Т.А. Максименко за ценные практические советы, а так же О.П. Рыбалову за помощь в приготовлении микрошлифа исследуемого образца эмиттера.

Литература

1. Результаты анализа тепловых процессов сильноточных катодов мощных ЭРД [Текст] / Г.А. Парухин, Н.Н. Кошелев, А.В. Лоян, О.П. Рыбалов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 10 (77). – С. 109-114.
2. Кошелев, Н.Н. Калориметрические измерения в полой катод [Текст] / Н.Н. Кошелев, О.П. Рыбалов, Т.А. Максименко // *Авиационно-*

космическая техника и технология. – 2012. – № 7 (94). – С. 157-161.

3. *Физические величины: Справочник [Текст] / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.*

4. *Васильев, Л.Л. Теплофизические свойства пористых тел [Текст] / Л.Л. Васильев, С.А. Танаева. – Минск: Наука и техника, 1971. – 265 с.*

5. *The Thermal Conductivity of Tungsten is an Argument [Электронный ресурс] / Режим доступа:*

https://dhs.stanford.edu/amusing-historical-map-features/the-thermal-conductivity-of-tungsten-is-an-argument/. – 13.08.2012 г.

6. *Thermal and mechanical properties of perovskite-type barium hafnate [Text] / Takuji Maekawa, Ken Kurosaki, Shinsuke Yamanaka // Journal of Alloys and Compounds. – 2006. – Vol. 407, Is. 1–2. – P. 44–48.*

7. *Макаров, Е.Г. Mathcad: учебный курс [Текст] / Е.Г. Макаров. – СПб.: Питер, 2009. – 384 с.*

Поступила в редакцию 03.06.2013, рассмотрена на редколлегии 12.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. кафедры А.И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский Авиационный Институт».

РОЗРАХУНКОВИЙ СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ МЕТАЛОПОРІСТИХ ЕМІТЕРІВ КАТОДІВ ЕРД

А.В. Лоян, М.Ю. Тітов, Є.П. Солонинко

У роботі представлений спосіб чисельного розрахунку ефективної теплопровідності пористих матеріалів на прикладі металопористого вольфрам-гафнат-барієвого емітера (W-BaHfO₃). Розрахунок теплопровідності здійснювався з використанням кінцево-елементного моделювання в ANSYS 11. За розрахованим в ANSYS тепловому потоку і заданим температурам кордонів була розрахована ефективна теплопровідність досліджуваного емітера в діапазоні температур 300 ... 2000 К. Виявлено збільшення ефективної теплопровідності емітера при температурах вище 700 К.

Ключові слова: теплопровідність, емітер, вольфрамова матриця, активна речовина.

ACCOUNTING METHOD FOR DETERMINATION OF EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY OF METAL-POROUS EMITTERS IN CATHODES FOR ELCTRIC PROPULSION

A.V. Loyan, M.Y. Titov, E.P. Solonyanko

This paper presents a method of numerical calculation of the effective thermal conductivity of porous materials by example of metal-porous hafnate-tungsten-barium emitter (W-BaHfO₃). The calculation of the thermal conductivity was performed using finite-element modeling in ANSYS 11. According to calculated heat flow in ANSYS and temperatures of model boundaries there was calculated effective thermal conductivity of the emitter in the temperature range 300 ... 2000 K. It was revealed that at the temperature of 700 K the effective thermal conductivity of the emitter begins to increase with increasing temperature.

Key words: thermal conductivity, emitter, tungsten matrix, active material.

Лоян Андрей Витальевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. кафедры 401 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.loyan@khai.edu.

Тітов Максим Юрьевич – инженер каф. 401 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: titov@d4.khai.edu.

Солонинко Евгений Павлович – аспирант каф. 401 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: solonynkoyevgen@gmail.com