

УДК 533.9.07

**Н. Н. КОШЕЛЕВ, А. В. ЛОЯН, А. И. ЦАГЛОВ**

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

## **РАЗРАБОТКА ВАКУУМНОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЕЧИ С МИНИМАЛЬНОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТЬЮ ТЕМПЕРАТУРЫ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ**

*В статье раскрыта необходимость обеспечения максимальной равномерности температуры в зоне вакуумной пайки и отжига деталей электроракетных двигательных установок. Описано методика разработки вакуумной печи с минимальной температурной неравномерностью. Предложена альтернативная трехзонному нагревателю конструкция, а именно нагреватель с переменным сечением. Показано, что увеличение сечения центральной части цилиндрического нагревателя приводит к снижению доли джоулева тепла, выделяемой в данной зоне, что обеспечивает перераспределение тепловой мощности по длине нагревателя. Путем моделирования продемонстрирована возможность снижения температурной неравномерности на детали сложной формы до 10–15° при 1100–1200° С. Разработана конструкция нагревателя.*

**Ключевые слова:** вакуумная печь, пайка, отжиг, нагреватель, неравномерность температуры.

### **Введение**

Современный электрореактивный двигатель (ЭРД) представляет собой сложное изделие, для обеспечения работоспособности и надежности которого требуется высокая точность изготовления всех его элементов. Разнообразие материалов, технологий их обработки и соединений выдвигает комплекс требований к проведению пайки и термообработки изделий вакуумной техники с допусками на температурную неравномерность от 20 до 5°С [1].

Основной технологией неразъемных соединений деталей электроракетных двигателей и безнакальных полых катодов в отделении ЭРД ХАИ [2, 3] является вакуумная пайка при давлениях не более  $3 \cdot 10^{-5}$  торр. Применение данной технологии позволяет создавать изделия сложной формы, соединять вместе такие материалы, как молибден, вольфрам, ковар и оксидную керамику и обеспечивать герметичность шва за счет отсутствия окисных пленок на поверхности паяемых деталей.

Кроме пайки в процессе изготовления изделий непосредственно применяются операции отжига деталей с целью получения необходимых магнитных и технологических свойств.

Стоит отметить, что пайка изделий электроракетных двигателей, работающих в условиях космического пространства и являющихся сильно теплонапряженными изделиями, требует применения специфических и дорогих припоев, давление насыщенных паров которых при температуре 500–700°С не превышает  $10^{-7}$  торр, что позволяет избежать напыления проводящих покрытий на диэлектрические изоляторы.

Использование дорогих металлов и сплавов безусловно диктует требования снижения вероятности брака паяных соединений, что в свою очередь возможно при соблюдении изложенных выше требований на температурную неравномерность.

С решением поставленной задачи успешно справляются цилиндрические печи с трехзонным нагревателем, в конструкции которых присутствуют три нагревательных элемента с отдельными источниками питания, регулирование мощности на которых позволяет получить требуемую температурную равномерность в рабочей зоне.

Однако стоимость такого оборудования очень высока. При этом имеющиеся в отделении ЭРД оборудование не позволяет обеспечить необходимую неравномерность температуры для операций пайки, отжига и термообработки на магнитные свойства деталей для двигателей типа СПД70 и СПД100, значит, требует модернизации.

Целью данной работы была разработка вакуумной печи, использующей один источник питания, с температурной неоднородностью не более 20° на деталях сложной формы при геометрических размерах цилиндрической рабочей зоны  $\varnothing 180 \cdot 150$  мм и температурах 900–1300°С.

### **Моделирование**

За основу при проектировании вакуумной печи был взят способ последовательных тепловых моделирований методом конечных

элементов в программном пакете ANSYS. Это позволило просчитать большее количество вариантов конструкций печи, выбрать оптимальный путь решения поставленной задачи и снизить временные трудозатраты.

В качестве модельной детали, подвергаемой нагреву в печи был взят магнитопровод электроракетного двигателя типа СПД-100 (рис. 1).

Такая деталь имеет тонкостенную конфигурацию при сложной форме и наличии взаимно экранирующих поверхностей. Было принято допущение, что обеспечение температурной однородности на данной детали позволит считать, что на деталях более простой формы температурная неоднородность будет меньше.

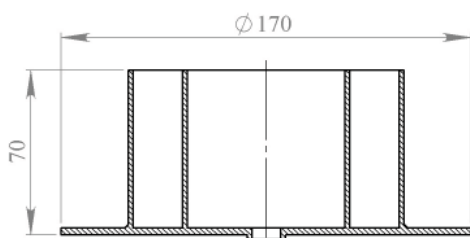


Рис. 1. Эскиз модельной детали

При проведении моделирования было сделано допущение, что печь является полностью осесимметричной, что позволило проводить 2D расчеты. Расчетная модель представлена на рис. 2.

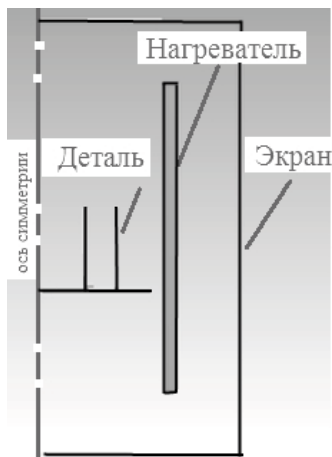


Рис. 2. Расчетная модель

На первом этапе моделирования был проведен анализ влияния экранирования (числа и материала экранов вакуумно-экранной изоляции) на степень температурной неоднородности по радиусу детали.

Для этого была проведена серия моделирований с различным числом экранов. Результаты моделирования (рис. 3) показали наличие сильной неоднородности по радиусу основания

детали (до 50 °С при применении одного экрана и до 30 °С при применении шести экранов).

Таким образом, стало ясно, что добиваться необходимой степени неравномерности температуры путем увеличения числа экранов экранно-вакуумной изоляции является технически нецелесообразным.

Для решения данной проблемы было предложено разбить нагреватель на три зоны (рис. 4а) с различным тепловыделением на них (1):

$$N = N_1 + 2 \cdot N_2, \quad (1)$$

где  $N$  – общая электрическая мощность, подаваемая на нагреватель,  $N_1$  – мощность, выделяемая в центральной зоне,  $N_2$  – мощность, выделяемая на каждой из периферийных зон.

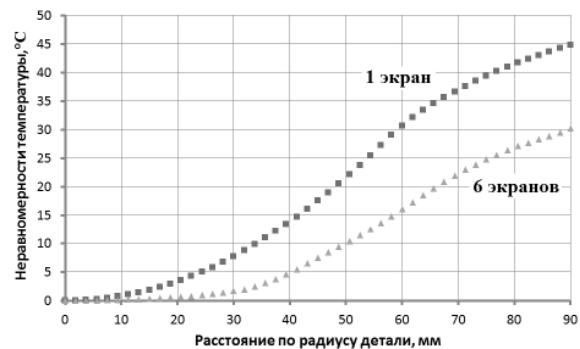


Рис. 3. Зависимость неравномерности температуры от радиуса основания модельной детали при различном числе экранов

Вторым этапом расчетов было проведение серии моделирований трехзонного нагревателя с целью нахождения необходимого соотношения мощностей между центральной и периферийными зонами и длины центральной зоны для обеспечения необходимой степени неоднородности.

Результаты моделирования показали, что доля мощности, выделяемая в центральной зоне, должна составлять 10-20% от общей электрической мощности при длинах центральной зоны и всего нагревателя 70-140 мм и 350..450 мм соответственно.

При этом применение трехзонного нагревателя полностью решало вопрос с требуемой температурной неоднородностью.

В качестве альтернативы трехзонному нагревателю авторами статьи был предложен другой способ повышения равномерности температуры в рабочей зоне печи – применение цилиндрического нагревателя переменного сечения (рис. 4б) с увеличенным сечением в центральной части с целью снижения доли джоулева тепла, выделяемой в данной области.

Для расчета требуемых геометрических параметров использовались следующие зависимости:

$$N = I^2 \cdot R = I^2 \cdot \rho \frac{h}{S}, \quad (2)$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{k}{1-k}, \quad (3)$$

$$D_2 = \sqrt{d^2 + \frac{1-k}{k} \frac{h}{H-h} (D_1^2 - d^2)}, \quad (4)$$

где  $R$  – электрическое сопротивление,  $S$  – площадь сечения нагревателя,  $k$  – доля мощности, выделяемая в центральной зоне,  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала нагревателя,  $h$  – длина центральной части нагревателя,  $H$  – общая длина нагревателя,  $d$  – внутренний диаметр нагревателя,  $D_1$  – наружный диаметр периферийных зон нагревателя,  $D_2$  – наружный диаметр центральной зоны нагревателя.

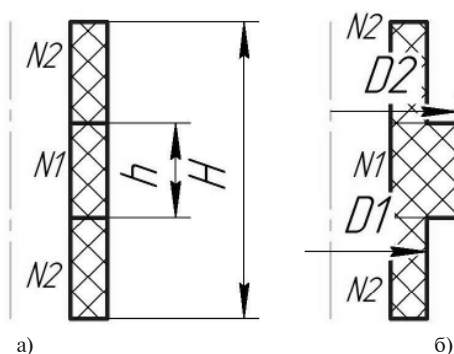


Рис. 4. Расчетные модели нагревателей: трехзонный нагреватель (а); нагреватель с переменным сечением (б)

Проведенные расчеты показали (рис. 5), что за счет увеличения сечения центральной части цилиндрического нагревателя возможно снизить долю джоулева тепла, выделяемой в данной зоне, и обеспечить перераспределение тепловой мощности по длине нагревателя.

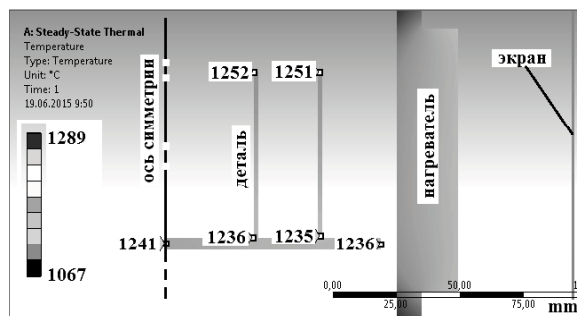


Рис. 5. Распределение температуры при финальном варианте конструкции нагревателя

Результаты моделирования предложенной конфигурации продемонстрировали возможность достижения поставленных требований по минимизации температурной неравномерности при следующих параметрах печи: электрическая мощность – 25 КВт, доля мощности, выделяемая в центральной части – 15%, длина центральной части – 100 мм, общая длина нагревателя 400 мм при внутреннем диаметре – 180 мм.

Полученная температурная неравномерность модельной детали составила не более 16°.

Результаты моделирования предложенной конструкции показали возможность снижения температурной неравномерности на детали до 7-16° при 900-1300 °С.

### Разработка конструкции

Результаты теоретических изысканий позволили разработать конструкцию нагревательного элемента вакуумной печи.

Ширина и количество ламелей нагревателя рассчитывались при учете установленных ограничений по току в 500 А и по напряжению в 40 В.

В качестве материала нагревателя было решено использовать графит, как материал, имеющий низкое удельное сопротивление, вес, коэффициент линейного расширения и широкий температурный диапазон применения.

Разработанная конструкция нагревателя представлена на рис. 6.

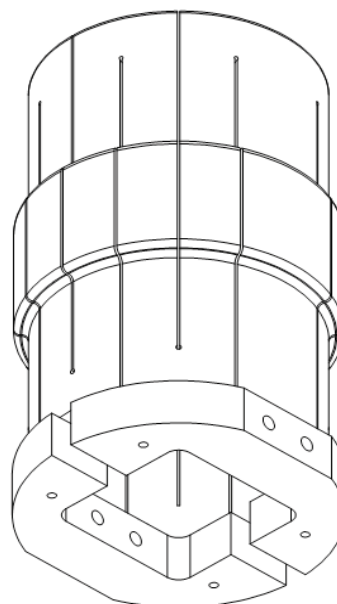


Рис. 6. 3D модель разработанного нагревателя

Таким образом, задача разработки печи с минимальной неравномерностью температуры в рабочей зоне была решена.

**Выводы и дальнейшие перспективы**

Авторами предложен метод минимизации температурной неравномерности в рабочей зоне цилиндрической вакуумной печи, а именно применение нагревателя переменного сечения с увеличенным сечением в центральной части с целью снижения доли тепловой мощности, выделяемой в данной области.

Разработана конструкция нагревателя, позволяющая снизить температурную неравномерность в рабочей зоне до 7-15° при 900-1300 °С.

Разработанную конструкцию после изготовления планируется установить на стенд вакуумной пайки отделения ЭРД ХАИ, что позволит проводить полный цикл пайки и температурной обработки деталей электроракетных двигателей, от маломощных типа СПД-20 до ЭРД типа СПД-100 с рабочей мощностью 1,5 кВт.

**Литература**

1. Гладков А.С. Пайка деталей электровакуумных приборов / А.С. Гладков, О.П. Подвигина, О.В. Чернов - М., Энергия, 1967 – 288 с.

2. Koshelev N. N. Investigation of Hollow Cathode for Low Power Hall Effect Thruster / N.N.Koshelev, A.V.Loyan // IEPС, Italy -2007-103.

3. Лоян А.В. Исследование распределения тепловых потоков в конструкции безнакального полого катода ЭРД при рабочих токах до 50 А / А.В.Лоян, Н.Н.Кошелев, А.И.Цаглов, М.Ю.Титов // // Авиационно-космическая техника и технология.- 2013.-№109 (107). - С.42 – 46.

*Поступила в редакцию 20.06.15*

**Цаглов О.І., Лоян А.В., Кошелев М.М. Розробка вакуумної високотемпературної печі з мінімальною нерівномірністю температури в робочій зоні**

*У статті розкрита необхідність забезпечення максимальної рівномірності температури в зоні вакуумної пайки та відпалу деталей електроракетних рушійних установок. Описано методику розробки вакуумної печі з мінімальною нерівномірністю температури. Запропонована альтернативна трьохзонному нагрівачу конструкція, а саме нагрівач з змінним перерізом. Показано, що збільшення перерізу центральної частини циліндричного нагрівачу призводить до зменшення долі джоулевого тепла, що виділяється у даній зоні, що забезпечує перерозподіл теплової потужності по довжині нагрівача. Шляхом моделювання продемонстровано можливість зниження температурної нерівномірності на деталі складної форми до 10-15° при температурі 1100-1200 °С. Розроблено конструкцію нагрівача.*

**Ключові слова:** вакуумна піч, пайка, відпал, нагрівач, нерівномірність температури.

**Tsaglov A.I., Loyan A.V., Koshelev N.N. Development of vacuum high temperature furnace with minimum temperature nonuniformity in working zone**

*In article is described necessity to provide maxim temperature uniformity in the zone of vacuum soldering and annealing of electric propulsion unit details. The methodology of vacuum heater with minimum temperature nonuniformity development is described. It is proposed an alternative for three section heater – a heater with variable section. It is shown, that increasing of cylindrical hater central part section is leaded to reducing of Joule heat, which deposited in this part, and providing heat rearrangement by heater length. It is demonstrated by modeling that it is a capability to reduce temperature nonuniformity on complex detail to 10-15° for temperature rage 1100-1200 °С. The construction of heater with variable section is designed.*

**Key words:** vacuum furnace, soldering, annealing, hater, temperature nonuniformity.