

Рисунок 1 – 15-я собственная частота рабочего колеса турбины ТКР-8.5-ТВ.

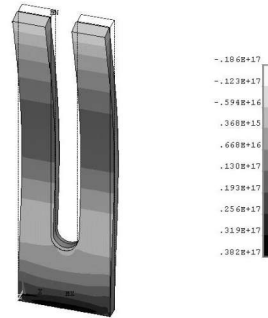


Рисунок 2 – 5-я собственная частот пьезоэлектрического резонатора

Данное исследование позволило провести классификацию задач анализа чувствительности мультифизических конечноэлементных моделей различной степени связанности и успешно апробировать анализ градиентов функционалов на ряде практических задач. Дальнейшим направлением исследований является применение разработанного математического аппарата при исследовании жизненного цикла ряда современных конструкций.

**Список литературы:** 1. Автономова Л.В., Лавинский В.И. Бондарь С.В. Узагальнена математична модель структурно зв'язаних систем // Вісник НТУ «ХПІ», – Харків: НТУ «ХПІ», – 2003. – Вип. 12, т.1. – С. 160-164. 2. Xu B. and Jiang J. S.. Integrated optimization of structure and control for piezoelectric intelligent trusses with uncertain placement of actuators and sensors // Computational Mechanics. – 2004. – Vol. 33, № 5. – P. 406-412. 3. Симсон Э.А., Назаренко С.А., Зюзин, А.Ю., В.Б. Любецкая В.Б. Анализ чувствительности для конечноэлементных моделей конструкций // Вестник НТУ «ХПИ». – 2003. – № 8, т. 3. – С. 77-82. 4. Богомолов С.И., Назаренко С.А., Симсон Э.А. Расчет и оптимизация оболочек общей формы на базе смешанного подхода МКЭ // Динамика и прочность тяжелых машин. – 1986. – С. 91-97.

Поступила в редколлегию 04.10.2006.

УДК 839.04:03

**В.О.ПОВГОРОДНИЙ**, канд.техн.наук, ИПМаш НАН Украины;  
**С.В.ЗАЙМАК**, НТУ «ХПИ»

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОУПРУГОСТИ МЕТАЛЛО-КЕРАМИЧЕСКОГО НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

Розглянуто шляхи розв'язання геометричних обернених задач термопружності. Задачі вирішуються за використанням методу скінчених елементів для металокерамічного нагрівального елемента.

In this article the determine of the geometrical inverse problem of thermoelasticity. This problem is determined by the finite element method. This problem is determined to the electrical hearts elements.

Металлокерамический нагревательный элемент (МКНЭ) представляет собой керамическую алюмооксидную пластину, в теле которой расположен резистивный элемент в виде металлизированных дорожек, как правило прямоугольной формы (рис. 1).

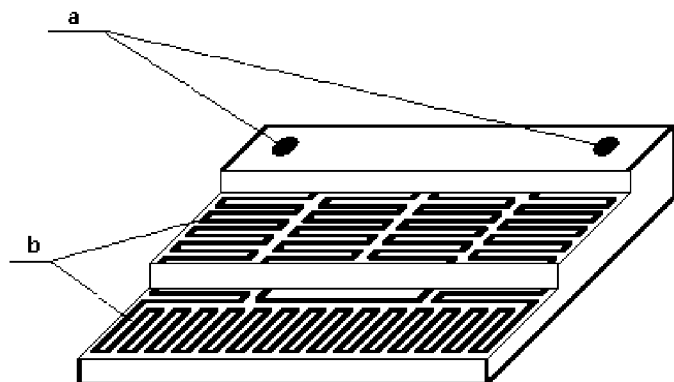


Рисунок 1 – Размещение резистивного элемента в теле нагревателя:  
а – контактные площадки для подключения электропитания;  
б – срезы по уровням размещения резистивного элемента

Технология изготовления МКНЭ заключается в следующем. Аллюмооксидная паста укладывается в несколько слоев и тем самым формируется тело нагревательного элемента. При этом между некоторыми слоями керамики с помощью трафарета наносится резистивная паста, которая образуется при добавлении в алюмооксидную пасту порошков металла (вольфрама и молибдена).

Резистивный элемент может наноситься в несколько слоев, соединенных последовательно. Затем полученная конструкция запекается в печи, после чего шлифуется и на поверхность пластины в местах вывода резистивных дорожек наносятся металлизированные контактные площадки [1].

**1. Математическая модель.** Используется метод конечных элементов (МКЭ). В рассмотрение был представлен один уровень МКНЭ. Геометрическая модель резистивного элемента в виде линий показана на рис. 2.

При современной технологии нанесения металлизированных дорожек на керамическое основание имеются следующие ограничения:

- минимальная толщина дорожки  $1,5 \cdot 10^{-5}$  м;
- минимальная ширина дорожки  $3,5 \cdot 10^{-4}$  м;
- толщина резистивного элемента 0,015 мм;
- размеры пластины нагревательного элемента  $100 \cdot 100 \cdot 2$  мм.

Материал резистивного элемента – вольфрам, физические характеристики которого представлены в табл. 1.

Материал пластины – керамика, физические характеристики которого представлены в табл. 2.

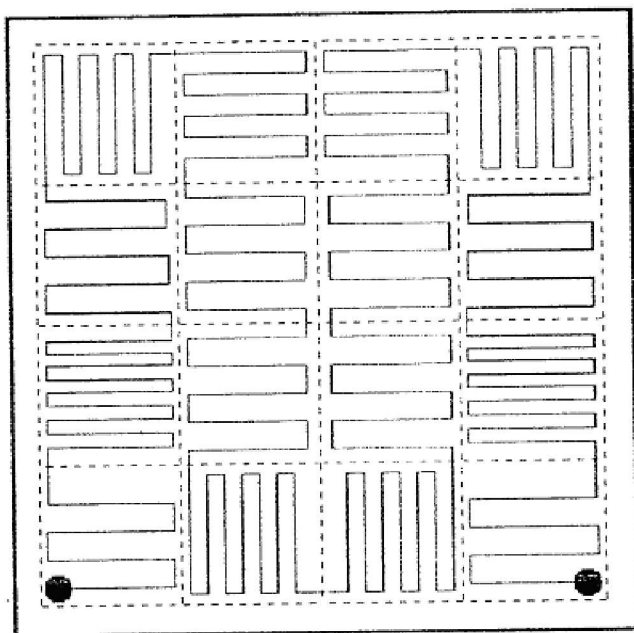


Рисунок 2 – Геометрическая модель резистивного элемента в виде линий

Таблица 1 – Теплофизические характеристики вольфрама

|                       |                  |                       |
|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Модуль Юнга, E        | Н/м <sup>2</sup> | $1,24 \cdot 10^{+11}$ |
| Модуль упругости, G   | Н/м <sup>2</sup> | $1,6 \cdot 10^{+11}$  |
| Теплопроводность      | Вт/м · °С        | 180                   |
| удельная теплоемкость | Кдж/кг · °С      | 0,134                 |

Таблица 2 – Теплофизические характеристики керамики

|                                 |                  |                         |
|---------------------------------|------------------|-------------------------|
| Модуль Юнга, E                  | Н/м <sup>2</sup> | $2,2059 \cdot 10^{+11}$ |
| Модуль упругости, G             | Н/м <sup>2</sup> | $9,04 \cdot 10^{+10}$   |
| Теплопроводность                | Вт/м · °С        | 40                      |
| удельная теплоемкость           | Кдж/кг · °С      | 0,122                   |
| Предел прочности при растяжении | Н/м <sup>2</sup> | $1,72 \cdot 10^{+08}$   |
| Предел прочности при сжатии     | Н/м <sup>2</sup> | $5,51 \cdot 10^{+08}$   |

При исследовании резистивный элемент рассматривался в виде линии, на которую равномерно действует температура от источника мощности.

При эксплуатации МКНЭ бывают отказы, которые можно разбить на три группы: разрушение керамической пластины, разрыв резистивной дорожки и нарушение крепления нагревательного элемента или его внешних выводов. Первый вид отказов происходит из-за превышения допустимой величины тер-

монапряжений. При превышении допустимой величины термонапряжений керамическая пластина разрушается вдоль линии, которая отражает наиболее слабые связи между компонентами керамики.

В принципе, для определения температурных напряжений в МКНЭ необходимо решать задачу термоупругости [см. 2]. Однако, допустимые термонапряжения многослойной керамики в настоящий момент неизвестны, а их измерение приводит к большим техническим сложностям. Кроме того, теория обратных задач термомеханики, с помощью решения которых можно по допустимым термонапряжениям определить допустимые пределы изменения входных параметров, не достаточно развита и в настоящий момент авторы статьи занимаются этой проблемой.

Разрыв резистивной дорожки происходит из-за больших термических напряжений. Если связь между резистивной дорожкой и керамикой слабая, то большое термонапряжение может привести к местному разрушению связующих звеньев. При этом нагрузка на остальные звенья может не превысить предельной, и керамическая пластина останется целой, а резистивная дорожка разорвется [3]. Этот случай происходит чаще всего, так как локальный нагрев из-за большой величины плотности электрического тока вызывает большие термонапряжения, которые могут привести к обрыву резистивной дорожки или даже разрушению всей керамической пластины (рис. 3).

На резистивный элемент, изготовленный из вольфрамовой нити диаметром 0,015 мм, действует постоянный электрический ток силой 5А и напряжением 36В. Максимальная температура на резистивном элементе определяется формулой

$$T_{\max} = \sqrt[5]{\frac{U^2}{\alpha R_0 \sigma S}},$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана  $\sigma = 5,6705 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>;

$S = \pi dl = 3,14 \cdot 0,015 \cdot 10^{-3} \cdot 1,75 = 8,24 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup> – площадь поверхности проводника;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления;

$U$  – напряжение;

$R_0$  – сопротивление.

Сопротивление выражается по формуле

$$R_0 = \rho \frac{l}{S_F} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1,75}{7,06 \cdot 10^{-10}} = 495,75 \text{ Ом},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление проводника;

$l$  – длина проводника;

$S_F = \pi d^2 = 3,14 \cdot (0,015 \cdot 10^{-3})^2 = 7,06 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup> – площадь поперечного сечения.

Максимальная температура проводника:

$$T_{\max} = \sqrt[5]{\frac{U^2}{\alpha R_0 \sigma S}} = \sqrt[5]{\frac{36^2}{4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 495,75 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 8,24 \cdot 10^{-5}}} = 678 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Интенсивность теплообмена на поверхности нагревателя  $30 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$  при температуре среды  $T_c = 50 \text{ °C}$ , а температура нагревателя  $678 \text{ °C}$  (рис. 4).

В качестве внешней нагрузки, прикладывалась температура внутри пластины. Пластина была закреплена жестко нижней частью. Конечно-элементная модель пластины состоит из 2288 элементов (без учета контактных) и 22918 узлов (рис. 5).

После проведения расчетов были получены графические результаты, приведенные на рис. 6-8.

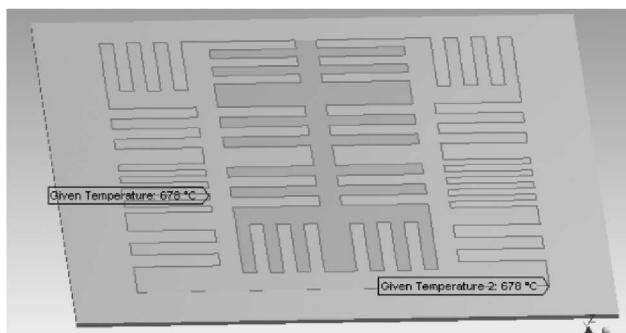


Рисунок 4 – Распределение температуры на нагревателе  $678 \text{ °C}$

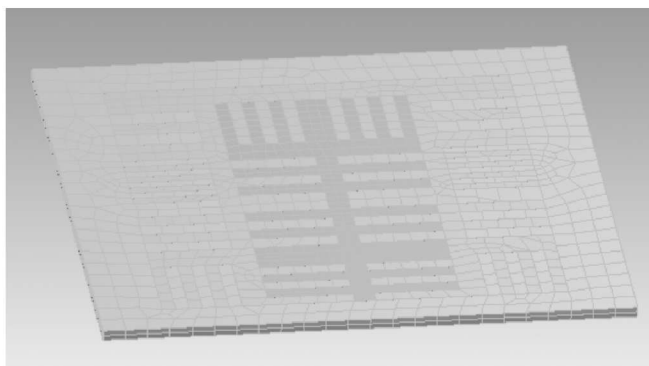


Рисунок 5 – Конечно-элементная модель керамической пластины, состоящая из 2288 элементов (без учета контактных) и 22918 узлов

**Выводы.** Проектирование МКНЭ можно рассматривать как задачу выбора такого размещения резистивного элемента, при котором получаются требуемые характеристики нагревателя и теплофизические характеристики материала нагревателя. Поэтому, задачу проектирования нагревательного элемента можно рассматривать как обратную задачу термоупругости, в которой варьируемыми параметрами являются как параметры размещения резистивных дорожек в теле нагревателя, так и теплофизические характеристики материала с ограничением на максимальные температурные напряжения [4].

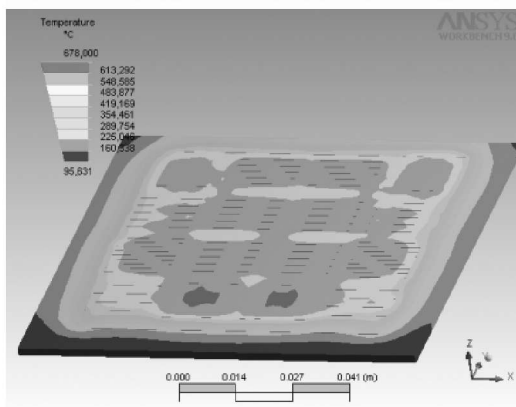
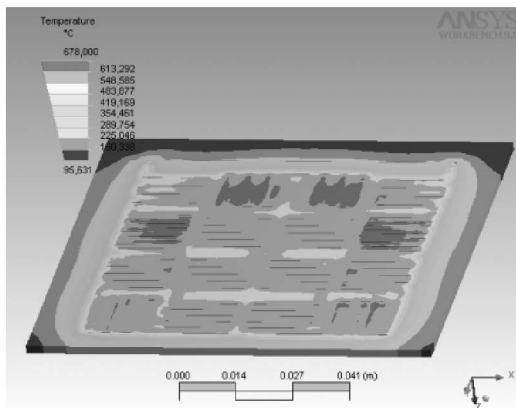


Рисунок 6 – Распределение температуры на пластине сверху и снизу

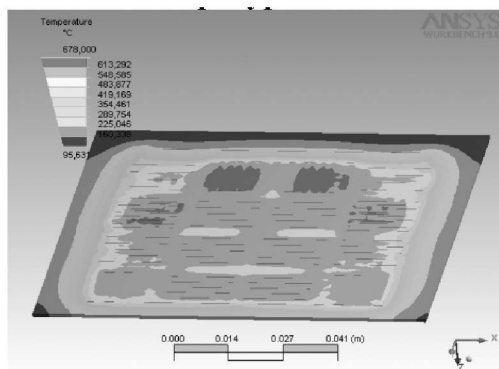


Рисунок 7 – Распределение температуры внутри пластины

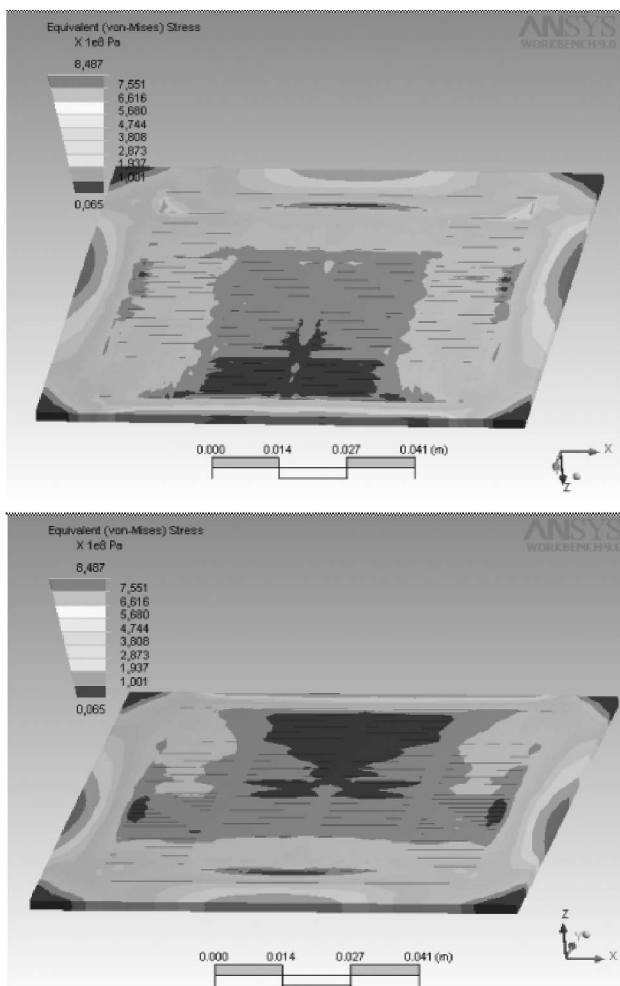


Рисунок 8 – Распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу) на пластине сверху и снизу

**Список литературы:** 1. С.В. Кузнецов, А.В. Петров Рекомендации для конструирования нагревательных устройств // Информационный листок Карельского ЦНТИ № 77-97. – 1997. 2. Коваленко А.Д. Термоупругость. – Киев: Вища школа, 1975. – 216 с. 3. Глушицкий И.В. Охлаждение бортовой аппаратуры авиационной техники. – М.: Машиностроение, 1987. – 184 с. 4. Вигак В.М. Управление температурными напряжениями и перемещениями. – Киев: Наукова думка, 1988. – 312 с.

Поступила в редакцию 15.04.2006