

УДК: 539.3

Ю. С. ВОРОБЬЕВ<sup>1</sup>, Н. Ю. ОВЧАРОВА<sup>1</sup>, Т. Ю. БЕРЛИЗОВА<sup>2</sup>, С. Б. КУЛИШОВ<sup>3</sup>,  
А. Н. СКРИЦКИЙ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков*

<sup>2</sup> *Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков*

<sup>3</sup> *ГП НПКГ «Зоря»-«Машипроект», Николаев, Украина*

## ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО И ТЕРМОУПРУГОГО СОСТОЯНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ОХЛАЖДАЕМОЙ ЛОПАТКИ ГТД

*Проведен анализ температурного и термоупругого состояний охлаждаемой монокристаллической лопатки с вихревой системой охлаждения. Построена трехмерная модель лопатки с учетом сложной геометрической формы и неоднородности материала. Методом конечных элементов решаются задачи: о распределении температур по объему лопатки и влиянию температурного поля на напряженно-деформированное состояние лопатки. Учитывается действие температурных полей и центробежных сил. Приводятся результаты численного анализа распределения температур и напряженно-деформированного состояния реальной лопатки.*

**Ключевые слова:** монокристаллический материал, охлаждаемая лопатка, МКЭ, термоупругость.

### Введение и постановка задачи

Стремление к экономичности двигателей связано с повышением температуры газа перед первой ступенью турбины. Возможности современных жаропрочных материалов работать при высоких температурах заметно отстают от возникающих потребностей. Поэтому широко используются различные схемы охлаждения. Возникающие при этом градиенты температуры вызывают высокие температурные напряжения. Сложная геометрическая форма охлаждаемых лопаток способствует возникновению концентрации и локализации напряжений [1–3]. Задача анализа термоупругого НДС в охлаждаемой лопатке является сложной и актуальной.

В работе рассматривается охлаждаемая лопатка из монокристаллического сплава. Она имеет эффективную, но сложную вихревую систему охлаждения, и отверстия для выхода воздуха для охлаждения части поверхности пера лопатки.

Общие уравнения термоупругости в системе координат  $x, y, z$  имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X &= \frac{\alpha E}{1-2\nu} \frac{\partial T}{\partial x}, \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y &= \frac{\alpha E}{1-2\nu} \frac{\partial T}{\partial y}, \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z &= \frac{\alpha E}{1-2\nu} \frac{\partial T}{\partial z}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – компоненты напряжений,

$T$  – температура,

$\alpha$  – коэффициент теплового расширения,

$E, \nu$  – упругие константы, которые зависят от температуры и ориентации кристаллографических осей.

При произвольной ориентации монокристалла матрица податливости заполнена полностью. Однако в случае совпадения осей лопатки  $x, y, z$  с кристаллографическими осями [100], [010] и [001], она имеет упрощенный вид и содержит три независимые упругие константы.

Соответственно матрица податливости согласно (1) имеет вид

$$S = K^{-1} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

На рисунке 1 показан общий вид лопатки с отверстиями для выхода охлаждаемого воздуха и форма внутренних охлаждающих каналов, а также положения кристаллографических осей (КГО) [2].

Зависимости коэффициентов матрицы (2) от температуры могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned} S_{11} &= A_{11} + A_{12}T + A_{13}T^2, \\ S_{12} &= A_{21} + A_{22}T + A_{23}T^2, \\ S_{13} &= A_{31} + A_{32}T + A_{33}T^2, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $A_{ij}$  – коэффициенты, определяемые для конкретного материала [3].

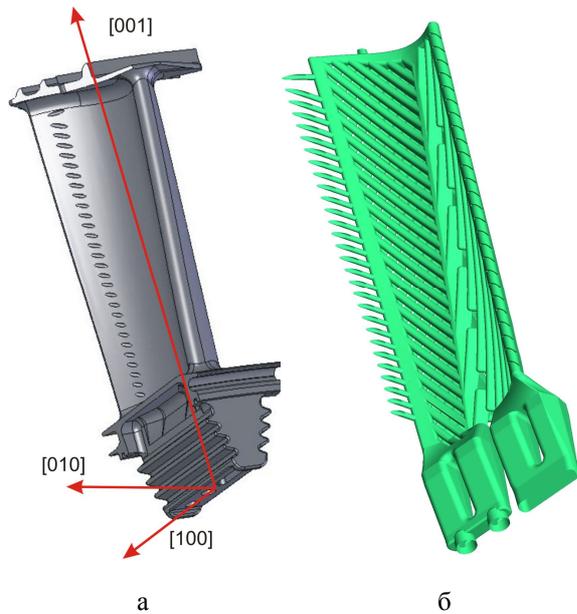


Рис. 1. Охлаждаемая лопатка с обозначением монокристаллических осей (а) и ее система охлаждения в виде вихревой матрицы (б)

Геометрия лопатки является очень сложной и не допускает разделения на части. Поэтому возникает необходимость рассмотрения ее в целостном виде. Сложность внутренней структуры делает построение регулярной гексаэдрической конечно-элементной сетки неоправданно трудоемким процессом.

Отмеченные ранее особенности конструкции рассматриваемой лопатки усложняют создание КЭ сетки. Поэтому ее геометрия должна быть обработана вручную и адаптирована под построение сетки с учетом предполагаемого размера минимального элемента, который определяет общее число элементов модели. В данном случае минимальный размер элемента составлял  $3,7713 \cdot 10^{-5}$  мм.

В работе использовано несколько КЭ моделей охлаждаемой лопатки, различающихся густотой и типом элементов (линейный или квадратичный) с различным числом степеней свободы (ЧСС), различным количеством элементов и узлов (Табл. 1).

Таблица 1

Характеристика использованных КЭ моделей охлаждаемой лопатки

Тип конечного элемента	Число элементов	Число узлов	ЧСС
Линейный тетраэдр (4х-узловой)	362 961	83 910	242 367
	602 363	132 908	382 806
	1 142 450	244 713	702 561
	2 069 921	436 228	1 264 614
Квадратичный тетраэдр (10-узловой)	362 961	580 031	1 704 114
	602 275	935 793	2 747 526
	745 393	1 072 656	3 217 968
	1 142 281	1 739 242	более 7 500 000
	2 069 727	3 117 290	более 9 000 000

Результаты расчета с использованием модели на основе квадратичного тетраэдра при ЧСС равном 3 217 968 приняты за "точное" значение, с которым сравнивались результаты, полученные на основе других моделей.

Так как температурные напряжения существенно зависят от градиентов температур, то необходимо уточнить температурное поле лопатки, используя имеющиеся исходные данные.

## 2. Анализ численных результатов

На основе данных о температуре на поверхности лопатки и температуре охлаждаемого воздуха решалась задача о температурном состоянии лопатки. Рисунок 2 дает представление о распределении температур по объему лопатки.

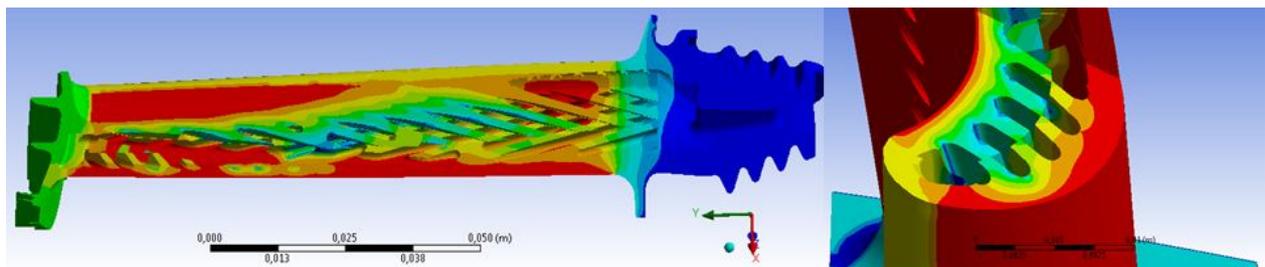


Рис. 2. Распределение температур в различных сечениях лопатки

В результате действия температурных полей лопатка изменяет свои линейные размеры. Определение температурного расширения лопатки позволяет обеспечить необходимые зазоры в лабиринтном уплотнении. Далее с учетом найденного температурного поля решалась задача термоупругости совместно с задачей статического деформирования под действием центробежных сил [4, 5]. Представление о распределении интенсивности статических деформаций в лопатке под действием центробежных сил и температурного поля дает рис. 3.

На рисунке 4 представлено распределение эквивалентных напряжений на поверхности и зоны локализации в охлаждаемых каналах. Видно, что максимальные напряжения возникают локально в охлаждаемых каналах.

Распределение интенсивностей напряжений по поверхности и в продольном сечении монокристаллической охлаждаемой лопатки представлено на рис. 5. Зоны максимальных интенсивностей температурных напряжений соответствуют зонам наибольших градиентов температур (см. рис. 2). Сравнение с НДС лопатки под действием только центробежных сил при температуре  $20\text{ C}^0$  [4] показывает, что основное влияние на НДС оказывает неравномерное температурное поле.

Наибольшая интенсивность напряжений при действии только центробежных сил составляет менее 1МПа. Наибольшая интенсивность напряжений при совместном действии центробежных сил и температурного поля составляет 260 МПа [5].

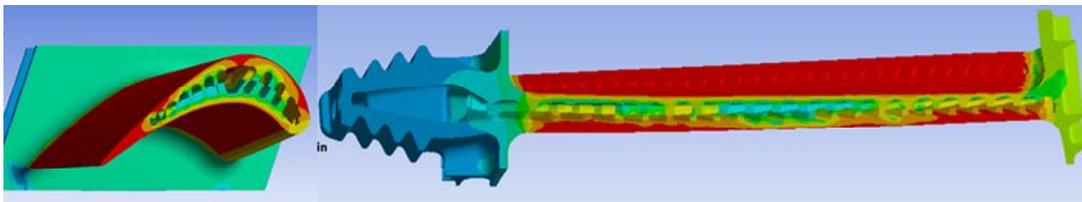


Рис. 3. Распределение интенсивностей деформаций в сечениях рабочей лопатки под действием центробежных сил и температурного поля



Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений на поверхности лопатки и в местах локализации

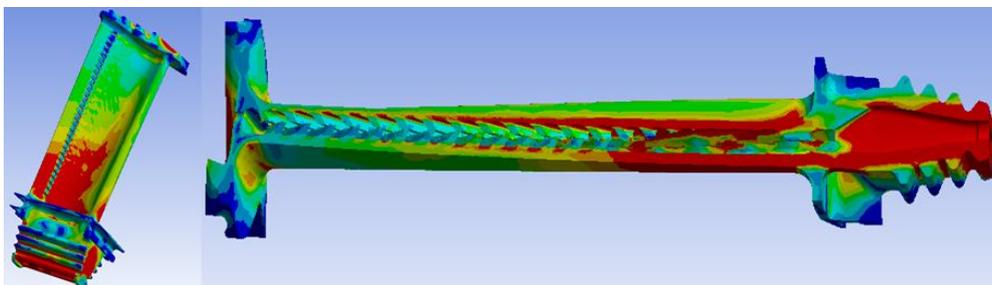


Рис. 5. Распределение интенсивностей напряжений на поверхности и в сечении рабочей лопатки под действием центробежных сил и температурного поля

### Заключение

Температурные поля охлаждаемой лопатки определяются температурой газа и охлаждающим воздухом. Они вызывают температурное расширение

лопатки, которое следует учитывать при определении зазоров в лабиринтном уплотнении.

Основной вклад в НДС лопатки вносят термоупругие напряжения. При этом наибольшие интенсивности напряжения находятся в местах макси-

мальных градиентов температур. Как правило, это соответствует местам на поверхности охлаждающих каналов и отверстий для выхода охлаждающего воздуха. Эти напряжения, контроль которых затруднен, соответствуют величине напряжений на поверхности лопатки. Это дает возможность контроля и диагностики максимальных напряжений.

Максимальные напряжения, возникающие при совместном действии центробежных сил и температурных полей не достигают предела прочности.

## Литература

1. Ножницкий, Ю. А. О прочностной надежности монокристаллических рабочих лопаток высокотемпературных турбин перспективных ГТД [Текст] / Ю. А. Ножницкий, Е. Р. Голубовский // Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования. Тр. ЦКТИ. – Вып. 296. – СПб., 2009. – С. 74-82.

2. Проблемы вибрационного состояния фундаментов, сейсмостойкости и прочности турбомашин. Часть 2 [Текст] / Ю. С. Воробьев, Л. Б. Гецов, Б. Е. Мельников, А. С. Семенов // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. – 2013. – № 1-4(183). – С. 302-319.

3. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов [Текст] : моногр. / Р. Е. Шалин, И. Л. Светлов, Е. Б. Качанов и др. – М. : Машиностроение, 1997. – 336 с.

4. Воробьев, Ю. С. Влияние центробежных сил на статику и динамику элементов ГТД [Текст] / Ю. С. Воробьев, Н. Ю. Овчарова, К. Д. Тыртышников // Восточно Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 3/12(63). – С. 47-49.

5. Анализ термоупругого состояния охлаждаемой монокристаллической лопатки ГТД [Текст] / Р. Жондовски, Ю. С. Воробьев, Н. Ю. Овчарова, Т. Ю. Евченко // Механіка та машинобудування. – 2013. – № 1 – С. 23 – 28.

Поступила в редакцию 5.04.2014, рассмотрена на редколлегии 17.06.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой С. В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## ОСОБЛИВОСТІ ТЕМПЕРАТУРНОГО І ТЕРМОПРУЖНОГО СТАНУ МОНОКРИСТАЛІЧНОЇ ОХОЛОДЖУВАНОЇ ЛОПАТКИ ГТД

*Ю. С. Воробйов, Н. Ю. Овчарова, Т. Ю. Берлізова, С. Б. Кулішов, О. М. Скрицький*

Проведено аналіз температурного і термопружної станів охолоджуваної монокристалічної лопатки з вихровою системою охолодження. Побудовано тривимірну модель лопатки з урахуванням складної геометричної форми і неоднорідності матеріалу. Методом скінчених елементів вирішуються задачі: про розподіл температур за об'ємом лопатки і впливу температурного поля на її напружено-деформований стан. Враховується дія температурних полів і відцентрових сил. Наводяться результати чисельного аналізу розподілу температур і напружено-деформованого стану реальної лопатки.

**Ключові слова:** монокристалічний матеріал, охолоджувана лопатка, МСЕ, термопружність.

## FEATURES TEMPERATURE AND THERMOELASTIC STATE OF MONOCRYSTALLINE COOLING BLADES OF GAS TURBINE ENGINES

*Yu. S. Vorobiov, N. Yu. Ovcharova, T. Yu. Berlizova, S. B. Kulishov, A. N. Skritsky*

The analysis of temperature and thermoelastic states of cooled single crystal blade of gas turbine engine with vortex cooling system are considered. Three-dimensional model taking into account the complex geometrical shape and material inhomogeneity was builded. Finite element method solved the problem: the temperature distribution by volume the blade and the influence of the temperature field on the stress-strain state of the blade. The effect of temperature fields and centrifugal forces take into account. Numerical investigation results of stress-strain state of real blade are presented.

**Keywords:** one single alloy, cooled blade, FEM, thermoelastic.

**Воробьев Юрий Сергеевич** – д-р техн. наук, профессор, Институт проблем машиностроения НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: vorobiev@ipmach.kharkov.ua.

**Овчарова Наталья Юрьевна** – ведущий инженер отдела нестационарных механических процессов, Институт проблем машиностроения НАН Украины, Харьков, Украина.

**Берлизова Татьяна Юрьевна** – аспирант, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина.

**Кулишов Сергей Борисович** – зам. Генерального конструктора по новой технике, ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина.

**Скрицкий Александр Николаевич** – начальник отдела динамики и прочности, ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина, e-mail: spe@machproekt.nikolaev.ua.