

## ЗАВИСИМОСТЬ ТЕРМОУПРУГОГО СОСТОЯНИЯ ОХЛАЖДАЕМОЙ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЛОПАТКИ ОТ АЗИМУТАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ОСЕЙ

Ю. С. ВОРОБЬЕВ<sup>1\*</sup>, Н. Ю. ОВЧАРОВА<sup>1</sup>, Т. Ю. БЕРЛИЗОВА<sup>2</sup>

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

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

\*email: vorobiev@ipmach.kharkov.ua

**АННОТАЦИЯ** Рассматриваются температурное и термоупругое состояния охлаждаемой монокристаллической лопатки со сложной вихревой системой охлаждения и каналами для выхода охлаждающего воздуха. Задача определения напряженно деформируемого состояния лопатки под действием температурных полей и центробежных сил решается методом конечных элементов. Рассмотрено влияние ориентации кристаллографических осей, на распределение и величину термоупругих напряжений по объему лопатки.

**Ключевые слова:** охлаждаемая лопатка, температурные поля, центробежные силы, термоупругие напряжения, монокристаллический материал, кристаллографические оси

**АННОТАЦІЯ** Розглядається температурний та термопружний стан охолоджуваної монокристалічної лопатки зі складною вихровою системою охолодження і каналами для виходу охолоджуючого повітря. Задача визначення напружено деформованого стану лопатки під дією температурних полів і відцентрових сил вирішується методом скінчених елементів. Розглянуто вплив орієнтації кристаллографічних вісей, на розподіл і величину термопружних напружень по об'єму лопатки.

**Ключові слова:** охолоджувана лопатка, температурні поля, відцентровані сили, термопружні напруження, монокристалічний матеріал, кристаллографічні вісі

## DEPENDENCE OF THERMOELASTICITY STATUS OF THE COOLING MONOCRYSTALLINE BLADES FROM AZIMUTHAL ORIENTATION CRYSTALLOGRAPHIC AXES

Yu. VOROBIEV<sup>1</sup>, N. OVCHAROVA<sup>1</sup>, T. BERLIZOVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>A.N. Podgorny Institute of Mechanical Engineering Problems NAS, Kharkov, UKRAINE

<sup>2</sup>National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, UKRAINE

**ABSTRACT** The thermal and thermo-elastic states of the single crystal cooled blade with the complex vortex cooling system and channels for output of the cooling air are considered. Temperature fields of cooled blades are determined by the temperature of gas and cooling air. They cause thermal expansion of the blade, which should be considered in case of definition of the clearances in the labyrinth sealings. Due to the large temperature gradients in such blades large thermoelastic stresses are arises. All this leads to the need to solve the thermal and thermoelastic problem for determining the stress strain state of the blade under the influence of temperature fields and centrifugal forces. Static stress strain state of the blade is determined by taking into account the temperature fields and centrifugal forces. The problem is solved by finite element method. The value of maximum stress depends mostly from the temperature condition of the blade, but the maximum stresses arising in the joint action of the centrifugal forces and temperature fields, but do not achieve the tensile strength. The influence of the orientation of the crystallographic axes on the distribution and value of thermoelastic stresses by volume of blade are considered. The stress distribution by volume the blades have rather complex character. When the vortex system of cooling, the channels for cooling air are arranged at an angle to the longitudinal axis of the blade. If change the orientation of the crystallographic axes occurs redistribution of the stress and changes the whole picture of the stress-strain state of the blades. Since the largest stress intensity can be in a new area of the blade, they will also depend on the geometrical features of this area and its temperature. If change the axial orientation of the crystallographic axes, the greatest stress intensity repeating periodically through the 90°. The results of research allow estimating the stress-strain state of the cooled single crystal blades in the inhomogeneous temperature field with the taking into account of the influence of the crystallographic axes, which is of practical interest.

**Keywords:** cooled blade, temperature fields, centrifugal forces, thermoelastic stresses, single crystal material, crystallographic axes.

### Введение и постановка задачи

В современных газотурбинных двигателях рабочие лопатки турбин подвержены воздействию высокотемпературного газового потока. Поэтому

лопатки изготавливаются из жаропрочных сплавов при одновременном использовании охлаждения через внутренние каналы. В современном производстве все чаще используются жаропрочные монокристаллические сплавы и сложные системы вихревого

охлаждения. В связи с большими градиентами температур в таких лопатках возникают большие термоупругие напряжения. Следует также учитывать температурное расширение лопатки, что влияет на зазоры в лабиринтных уплотнениях. Все это приводит к необходимости решать температурную и термоупругую задачи для определения напряженно-деформированного состояния лопатки под действием температурных полей и центробежных сил. Внешнее охлаждение часто используется на части поверхности лопатки, например в области выходной кромки. Возникающие при этом в теле лопатки градиенты температуры вызывают высокие температурные напряжения. Наибольшей статической прочностью обладают современные жаропрочные монокристаллические сплавы, упругие свойства которых зависят от ориентации кристаллографических осей (КГО) [1 - 10].

Хорошо известно, что изменение положения КГО существенно влияет на распределение и величину термоупругих напряжений. Целью данной работы является исследование влияния изменения азимутальной ориентации кристаллографических осей на термоупругое напряженно-деформированное состояние лопатки, что представляет актуальную задачу.

#### Объект исследования и его расчетная модель

В данном случае рассматривается охлаждаемая монокристаллическая лопатка с эффективной, но сложной системой вихревого охлаждения [11]. Рис. 1 дает представление о конструкции лопатки, система охлаждающих каналов, расположении КГО и направлении их поворота в процессе исследований.

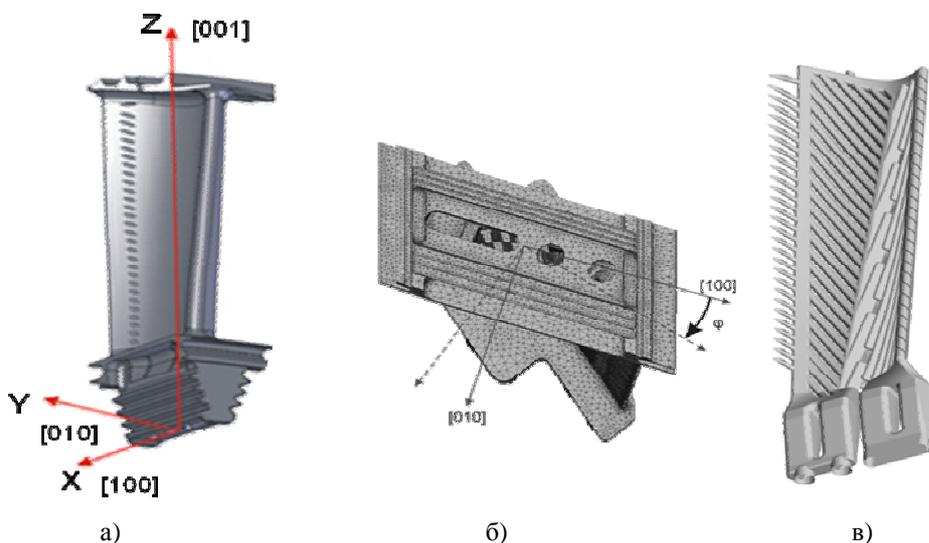


Рис. 1 – Охлаждаемая лопатка с обозначением монокристаллических осей (а), направление поворота КГО (б) и ее система внутренних охлаждаемых каналов в виде вихревой матрицы (в)

Вблизи выходной кромки расположены каналы для выхода охлаждающего воздуха, что обеспечивает внешнее охлаждение довольно тонкой выходной кромки. Возникающее температурное поле с высокими градиентами температур вызывает температурное расширение лопаток и высокие температурные напряжения. Поэтому необходимо решение взаимосвязанных задач определения температурного и термоупругого состояния охлаждаемой монокристаллической лопатки.

#### Численный анализ температурного и термоупругого состояния лопатки

В качестве исходных данных были заданы температуры различных участков лопатки, которые

менялись от 580 °С до 810 °С. С помощью осреднения было получено температурное поле лопатки.

Кроме того решалась задача теплопроводности для случая, когда температура газа на поверхности лопатки 850 °С, а температура охлаждающего воздуха на входе в систему охлаждения - 600 °С

Данная лопатка имеет перепад температур как в продольном направлении, так и в поперечных сечениях. Поэтому задача должна решаться как трехмерная [11, 12].

В качестве исходных данных были заданы температура участков лопатки. С помощью осреднения было получено температурное поле лопатки. Кроме того, решалась задача теплопроводности, когда была известна температура газа на поверхности лопатки и температура охлаждающего воздуха. В данном случае

рассматривается стационарная задача теплопроводности, которая сводится к решению вариационного уравнения  $\delta J = 0$  для функционала

$$J = \frac{1}{2} \iiint_V \lambda \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz + \frac{1}{2} \sum_k \iint_{(S_k)} h_k (T - T_k)^2 dS_k, \quad (1)$$

где  $V$  – объем тела,  
 $T$  – температура;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  
 $S_k$  – поверхность участков лопатки и охлаждающих каналов,  
 $k$  – номера участков поверхности лопатки и охлаждающих каналов.

Характер матриц податливости для данной задачи с учетом свойств монокристаллического материала описан в работах [4, 11, 12]. Решение задачи термоупругости позволяет провести анализ напряженно-деформированного состояния (НДС). Оно проводилось совместно с задачей о напряженно-деформированном состоянии лопатки под действием центробежных сил. В общем случае матрица податливости для монокристаллической лопатки является полностью заполненной [4]. В данном случае кристаллографические оси [100], [010], [001] совпадают с осями лопатки  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . При этом матрица податливости приобретает вид:

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

Зависимости коэффициентов матрицы податливости (2) от температуры  $T$  для монокристаллической лопатки могут быть представлены в виде [4]

$$\begin{aligned} s_{11} &= h_{11} + h_{12}T + h_{13}T^2; \\ s_{12} &= h_{21} + h_{22}T + h_{23}T^2; \\ s_{44} &= h_{31} + h_{32}T + h_{33}T^2, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $h_{ij}$  – коэффициенты, определяемые для конкретного материала.

Центробежные силы вызывают наибольшую интенсивность напряжений порядка 1 МПа [12], в то время как наибольшая интенсивность термоупругих напряжений достигает 260 МПа. Причем наблюдается большая неоднородность распределения напряжений и проявление их локализации. Известно, что ориентация кристаллографических осей оказывает существенное влияние на распределение полей напряжений. В данном случае исследовалось влияние поворота кристаллографических осей в плоскости  $xy$  вокруг оси  $z$ , которая соответствует кристаллографической оси [001].

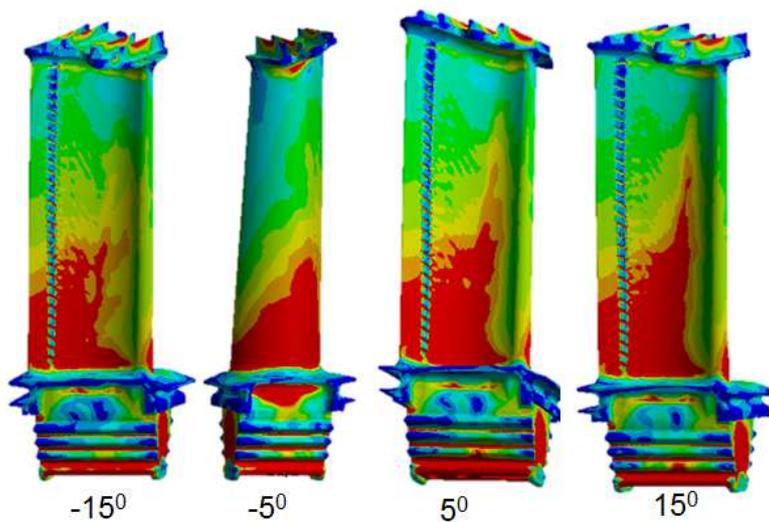


Рис. 2 – Изменение полей интенсивностей напряжений на поверхности лопатки при повороте кристаллографических осей от  $-15^\circ$  до  $15^\circ$ .



На рис. 2 показано влияние поворота кристаллографических осей на распределение интенсивностей напряжений на поверхности лопатки.

Видно общее снижение интенсивности термоупругих напряжений от корня к периферии и существенное изменение полей напряжений при повороте кристаллографических осей.

Наличие отверстий для выхода охлаждающего воздуха значительно снижает температуру и интенсивность напряжений у выходной кромки лопатки.

Распределение напряжений по объему лопатки носят довольно сложный характер. При вихревой системе охлаждения каналы для охлаждающего

воздуха расположены под углом к продольной оси лопатки. При изменении ориентации кристаллографических осей происходит перераспределение всех напряжений и изменение всей картины НДС лопатки. Так как наибольшие интенсивности напряжений могут быть при этом в новой области лопатки, то они будут зависеть также от геометрических особенностей этой области и ее температуры. Целесообразно построить некоторую кривую, которая отражает изменение наибольших интенсивностей напряжений независимо от места их расположения при изменении ориентации КГО (рис. 3).

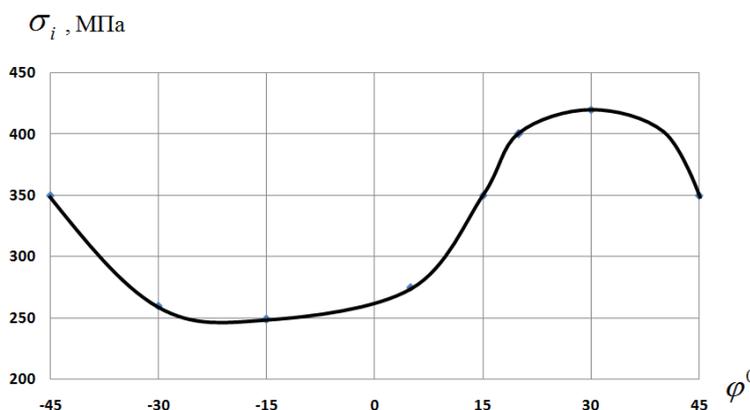


Рис.3 – Изменение наибольших интенсивностей напряжений в лопатке при повороте КГО [100], [010] вокруг оси [001] на угол  $\varphi$

Видно, что при повороте КГО [100], [010] вокруг оси [001], совпадающей с осью z, наибольшие интенсивности напряжений изменяются периодически, повторяясь через  $90^\circ$ . Периодическое изменение частотных характеристик лопатки наблюдается при изменении азимутальной ориентации КГО [13], при этом места локализации статических и вибрационных напряжений могут совпадать.

### Выводы

Температурное состояние охлаждаемой лопатки зависит от температуры газа, охлаждающего воздуха и конструкции лопатки. Оно влияет на изменение геометрических размеров лопатки, что следует учитывать при определении зазоров в лабиринтных уплотнениях.

Основной вклад в НДС лопатки вносят термоупругие напряжения. Напряжения от центробежных сил достигают значительно меньших значений. При повороте кристаллографических осей вокруг оси z по часовой стрелке наблюдается тенденция повышения наибольших интенсивностей напряжений более чем на 30%. При этом

минимальные интенсивности напряжений наоборот снижаются, так что некоторый средний уровень напряжений сохраняется. При повороте кристаллографических осей против часовой стрелки происходит обратный процесс. Общая картина НДС циклически повторяется при повороте кристаллографических осей на  $90^\circ$  (от  $-45^\circ$  до  $45^\circ$ ). Однако, максимальные интенсивности напряжений значительно ниже статического предела прочности для монокристаллических материалов.

### Список литературы

1. **Ножницкий, Ю. А.** О прочностной надежности монокристаллических рабочих лопаток высокотемпературных турбин перспективных ГТД / **Ю. А. Ножницкий, Е. Р. Голубовский** // *Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования. Тр. ЦКТИ.* – Вып. 296. – СПб, 2009. – С. 74 – 82.
2. **Зысина-Моложан, Л. М.** Теплообмен в турбомашине / **Л. М. Зысина-Моложан, Л. В. Зысин, М. П. Поляк.** – Л. Машиностроение, 1974. – 336 с.
3. **Wolf, D. S.** Stress analysis of a first turbine vane using 3-dimensional model with non-linear material behavior subjected to transient temperatures // *AIAA Pap.* №1437. – 1981. – 5 p.

4. **Шалин, Р. Е.** Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов: моногр. / **Р. Е. Шалин, И. Л. Светлов, Е. Б. Качанов** и др. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
5. **Придорожный Р. П.** Влияние кристаллографической ориентации на объемное напряженно-деформированное состояние монокристаллической неохлаждаемой лопатки турбины / **Р. П. Придорожный, А. В. Шереметьев**, // *Вестник двигателестроения* – 2003. – №1. – С. 47-51.
6. **Придорожный, Р. П.** Оценка влияния азимутальной ориентации на напряженность монокристаллической охлаждаемой лопатки в системе перфорационных отверстий / **Р. П. Придорожный, А. В. Шереметьев, А. П. Зиньковский** // *Вестник двигателестроения*. – 2013. – №1. – С.53-57.
7. **Копелев, С. З.** Охлаждаемые лопатки газовых турбин: Расчет и профилирование. – М.: Наука, 1983. – 145 с.
8. **Carter, T. J.** Common failures in gas turbine blades / **T. J. Carter** // *Engineering Failure Analysis* – 2005. 12(2) – P. 237-247.
9. **Yahya, S. M.** Turbines Compressors and Fans / **S. M. Yahya** // *New delhi: Tata McGraw-Hill Education*. – 2010. P. 430–433. ISBN 9780070707023.
10. **Ebrahimia, F.** / Effect of notch orientation on the evolution of plasticity in superalloy single crystals / **F. Ebrahimia, L. E. Foreroa, S. Siddiquib, N. Arakereb** // *Mechanical and Aerospace Engineering*. University of Florida, Gainesville, FL, United States. – May 2006.
11. **Жондковски, Р.** Анализ термоупругого состояния охлаждаемой монокристаллической лопатки ГТД / **Р. Жондковски, Ю. С. Воробьев, Н. Ю. Овчарова, Т. Ю. Евченко** // *Механiка та машинобудування*. – 2013. – № 1 – С. 23 – 28.
12. **Воробьев, Ю. С.** Особенности температурного и термоупругого состояния монокристаллической охлаждаемой лопатки ГТД / **Ю. С. Воробьев, Н. Ю. Овчарова, Т. Ю. Берлизова, С. Б. Кулишов, А. Н. Скрицкий** // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Харьков: НАКУ «ХАИ» – 2014. – № 10 (117). – С. 75 – 78.
13. **Vorobiov, Iu. S.** Vibration characteristics of cooled single-crystal gas turbine blades / **Iu. S. Vorobiov, K. Yu. Dyakonenko, S. B. Kulishov, A. N. Skritskij** and **R. Rzdkowski** // *Journal of vibration engineering & technologies*. – Vol. 2, No. 6, December 2014. – P. 537-541.
2. **Zysina-Molozhan, L. M., Zysin, L. V., Polyak, M. P.** Teploobmen v turbomashinakh – L. Mashinostroyeniye, 1974. – 336 s.
3. **Wolf, D. S.** Stress analysis of a first turbin vane using 3-dimensional model with non-linear material behavior subjected to transient temperatures // *AIAA Pap.* №1437.– 1981. – 5 p.
4. **Shalin, R. Ye., Svetlov, I. L., Kachanov, Ye. B. et. al.** Monokristally nikelovykh zharoprochnykh splavov: monogr. – М.: Mashinostroyeniye, 1997. – 336 s.
5. **Pridorozhnyy, R. P., Sheremet'yev, A. V.** Vliyaniye kristallograficheskoy orientatsii na ob'yemnoye napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye monokristallicheskoy neokhlazhdayemoy lopatki turbiny. *Vestnik dvigatelestroyeniya* – 2003. – №1. – S. 47-51.
6. **Pridorozhnyy, R. P., Sheremet'yev, A. V., Zin'kovskiy, A. P.** Otsenka vliyaniya azimutal'noy orientatsii na napryazhennost' monokristallicheskoy okhlazhdayemoy lopatki v sisteme perforatsionnykh otverstiy. *Vestnik dvigatelestroyeniya*. – 2013. – №1. – S. 53-57.
7. **Kopelev, S. Z.** Okhlazhdayemyye lopatki gazovykh turbin: Raschet i profilirovaniye. – М.: Nauka – 1983. – 145 s.
8. **Carter, T. J.** Common failures in gas turbine blades. *Engineering Failure Analysis* - 2005. 12(2) – P. 237-247.
9. **Yahya, S. M.** Turbines Compressors and Fans *New delhi: Tata McGraw-Hill Education*. – 2010. – P. 430-433. ISBN 9780070707023.
10. **Ebrahimia, F., Foreroa, L. E., Siddiquib, S., Arakereb, N.** Effect of notch orientation on the evolution of plasticity in superalloy single crystals. *Mechanical and Aerospace Engineering*. University of Florida, Gainesville, FL, United States. – May 2006.
11. **Zhondkovski, R., Vorob'yev, Yu. S., Ovcharova, N. Yu., Yevchenko, T. Yu.** Analiz termouprugogo sostoyaniya okhlazhdayemoy monokristallicheskoy lopatki GTD. *Mekhanika ta mashinobuduvannya*. – 2013. – № 1 – S. 23 – 28.
12. **Vorob'yev, Yu. S., Ovcharova, N. Yu., Berlizova, T. Yu., Kulishov, S. B., Skritskiy, A. N.** Osobennosti temperaturnogo i termouprugogo sostoyaniya monokristallicheskoy okhlazhdayemoy lopatki GTD. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. – Khar'kov: NAKU «KHAI» – 2014, №10 (117). – S. 75 – 78.
13. **Vorobiov, Iu. S., Dyakonenko, K. Yu., Kulishov, S. B., Skritskij, A. N. and Rzdkowski, R.** Vibration characteristics of cooled single-crystal gas turbine blades. *Journal of vibration engineering & technologies*. – Vol. 2, No. 6, December 2014. – S. 537-541.

#### Bibliography (transliterated)

1. **Nozhnitskiy, Yu. A., Golubovskiy, Ye. R.** O prochnostnoy nadezhnosti monokristallicheskikh rabochikh lopatok vysokotemperaturnykh turbin perspektivnykh GTD. *Prochnost' materialov i resursy elementov energooborudovaniya*. Tr. TSKTI. – Вып. 296. – SPb, 2009.– S. 74 – 82.

Поступила (received) 15.05.2015