

Ю. С. Воробьев, д-р техн. наук, проф., Н. Ю. Овчарова, ведущий инженер (Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков, Украина);  
Р. Жондковски, д-р техн. наук, проф. (Институт проточных машин им. Р. Шевальского Польской Академии наук, г. Гданьск, Польша); Т. Ю. Берлизова, аспирант (Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков, Украина)

## Напряженно деформированное состояние охлаждаемой монокристаллической лопатки ГТД в температурном поле с учетом влияния ориентации кристаллографических осей

*Рассматриваются температурное и термоупругое состояния охлаждаемой монокристаллической лопатки со сложной вихревой системой охлаждения и каналами для выхода охлаждающего воздуха. Задача определения напряженно деформированного 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.

*Rozглядається температурне і термопружний стан охолоджуваної монокристалічної лопатки зі складною вихровою системою охолодження та 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 осей на розподіл та величину термопружних напружень за обсягом лопатки.*

**Ключові слова:** лопатка, що охолоджується, температурні поля, відцентрові сили, термопружна напруження, монокристалічний матеріал, кристаллографічні осі.

*We consider thermal and thermo-elastic states of single crystal cooled blade with complex vortex cooling system and output channels of cooling air. The problem of determining the stress strain state of the blade under the influence of temperature fields and centrifugal forces is solved by finite element method. We considered the influence of the orientation of the crystallographic axes on the distribution and value of thermoelastic stresses by volume of blade.*

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

### Введение

Повышение эффективности современных газотурбинных двигателей (ГТД) связано с ростом максимальной температуры газа. Эти параметры определяются возможностью создания, в первую очередь, лопатки первой ступени, которая обычно является охлаждаемой, а также лопаток последующих ступеней. 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. Использование охлаждаемых рабочих лопаток газовых турбин вызвано тем, что возможности современных жаропрочных материалов работать при высоких температурах заметно отстают от возникающих потребностей современного газотурбостроения [1]. Поэтому широко используются различные системы

охлаждения рабочих лопаток ГТД. В связи с большими градиентами температур, в таких лопатках возникают высокие термоупругие напряжения. Следует также учитывать температурное расширение лопатки, которое 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. Наибольшей статической прочностью обладают современные жаропрочные монокристаллические сплавы, упругие свойства которых зависят от ориентации кристаллографических осей (КГО) [1, 2].

Хорошо известно, что изменение положения КГО существенно влияет на распределение и величину термоупругих напряжений. Анализ напряженно-

деформированного состояния в охлаждаемых монокристаллических лопатках и влиянию на него ориентации кристаллографических осей посвящен ряд работ [1–10]. В работах [5, 6] рассмотрено НДС монокристаллической лопатки с системой прямых охлаждаемых каналов и влияние на него ориентации КГО. В работах [11, 12] проведен анализ термоупругого состояния охлаждаемой монокристаллической лопатки с вихревой системой охлаждения.

Целью данной работы является исследование термоупругого состояния лопатки с вихревой и частично пленочной системами охлаждения и влияния изменения азимутальной ориентации кристаллографических осей на напряженно-деформированное состояние лопатки.

### Постановка задачи

В данном случае рассматривается охлаждаемая монокристаллическая лопатка с эффективной,

но сложной системой вихревого охлаждения. На рис. 1 представлены конструкция лопатки, система охлаждающих каналов, расположении КГО и направлении их поворота в процессе исследований.

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.

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

#### Численный анализ температурного и термоупругого состояния лопатки

В качестве исходных данных были заданы температуры различных участков лопатки, которые менялись от 580 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. Решение температурной задачи с заданными граничными условиями позволило получить распределение температур по объему лопатки [11]. Окончательное температурное поле отражено на рис. 2 в продольном и поперечном разрезах лопатки.

Хорошо видно, что наибольшие градиенты температур наблюдаются в поперечных сечениях, которые заметно превосходят таковые по длине лопатки.

Далее с учетом найденного температурного поля решалась задача термоупругости совместно с задачей статического деформирования под действием центробежных сил [11]. На рис. 3 представлено распределение интенсивностей напряжений на поверхности лопатки, а также в продольном и попереч-

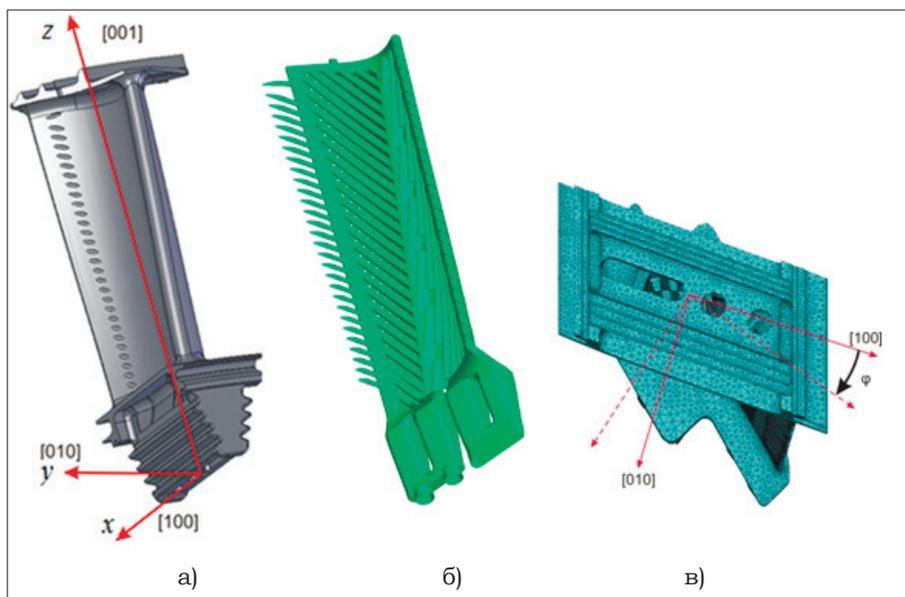


Рис. 1. Охлаждаемая лопатка с обозначением монокристаллических осей (а), направление поворота КГО (б) и ее система внутренних охлаждаемых каналов в виде вихревой матрицы (в)

ном сечениях. Видно, что максимальные напряжения на поверхности лопатки возникают в области корневого сечения. Это соответствует зоне наибольших градиентов температур на поверхности лопатки (рис. 2). Наибольшие интенсивности напряжений по сечениям лопатки расположены ближе к выходной кромке.

Распределение эквивалентных напряжений в сечениях лопатки представлено на рис. 4. Для распределения эквивалентных напряжений наблюдаются те же закономерности, что и для интенсивностей напряжений.

Сравнение с НДС лопатки под действием только центробежных сил при температуре 20 °С показывает, что основное влияние на НДС оказывает воздействие температурного поля.

Наибольшая интенсивность напряжений при действии только центробежных сил составляет не более 1 МПа. Наибольшая интенсивность напряжений при совместном действии центробежных сил и температурного поля не превышает 450 МПа.

Известно, что ориентация кристаллографических осей оказывает существенное влияние на распределение полей напряжений [5, 6, 11]. В данном случае исследовалось влияние поворота кристаллографических осей в плоскости  $xy$  вокруг оси  $z$ , которая соответствует кристаллографической оси [001], для монокристаллической лопатки с вихревой системой охлаждения. На рис. 5 показано характерное распределение интенсивностей напряжений на поверхности лопатки при нескольких

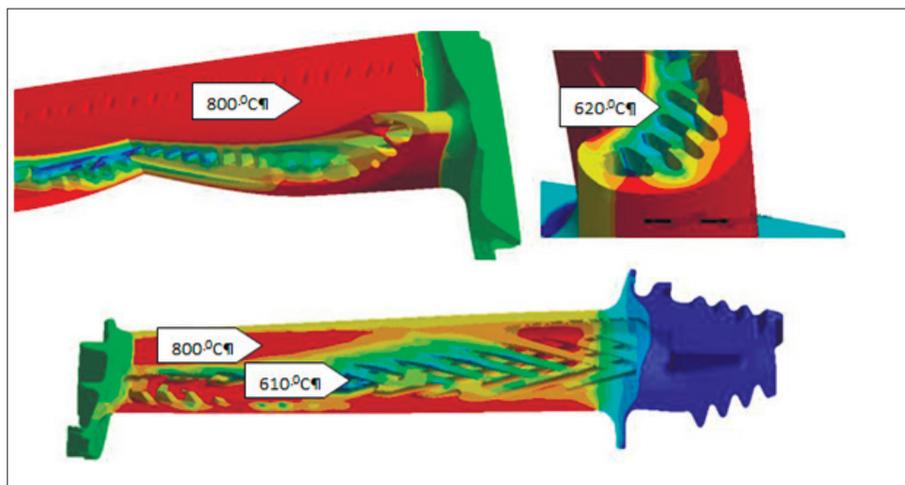
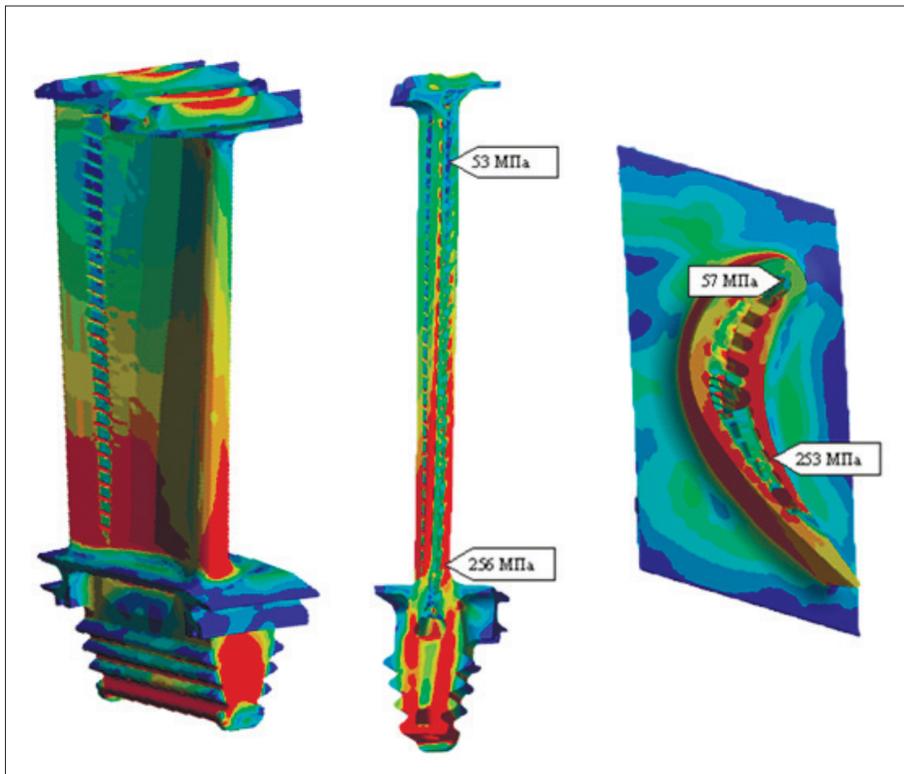


Рис. 2. Распределение температур в различных сечениях лопатки



**Рис. 3. Распределение интенсивностей напряжений на поверхности лопатки и в сечениях рабочей лопатки под действием центробежных сил и температурного поля**

положениях кристаллографических осей. Из рисунка видно общее снижение интенсивности термоупругих напряжений от корня к периферии и существенное изменение полей напряжений при повороте кристаллографических осей.

Кроме того наблюдается локализация напряжений вблизи отверстий для выхода охлаждающего воздуха. Это объясняется тем, что наличие отверстий для выхода охлаждающего воздуха, хотя значительно и снижает температуру у выходной кромки лопатки, но вызывает существенные градиенты температуры и местное повышение интенсивностей напряжений. При этом порядок напряжений от центробежных сил не меняется.

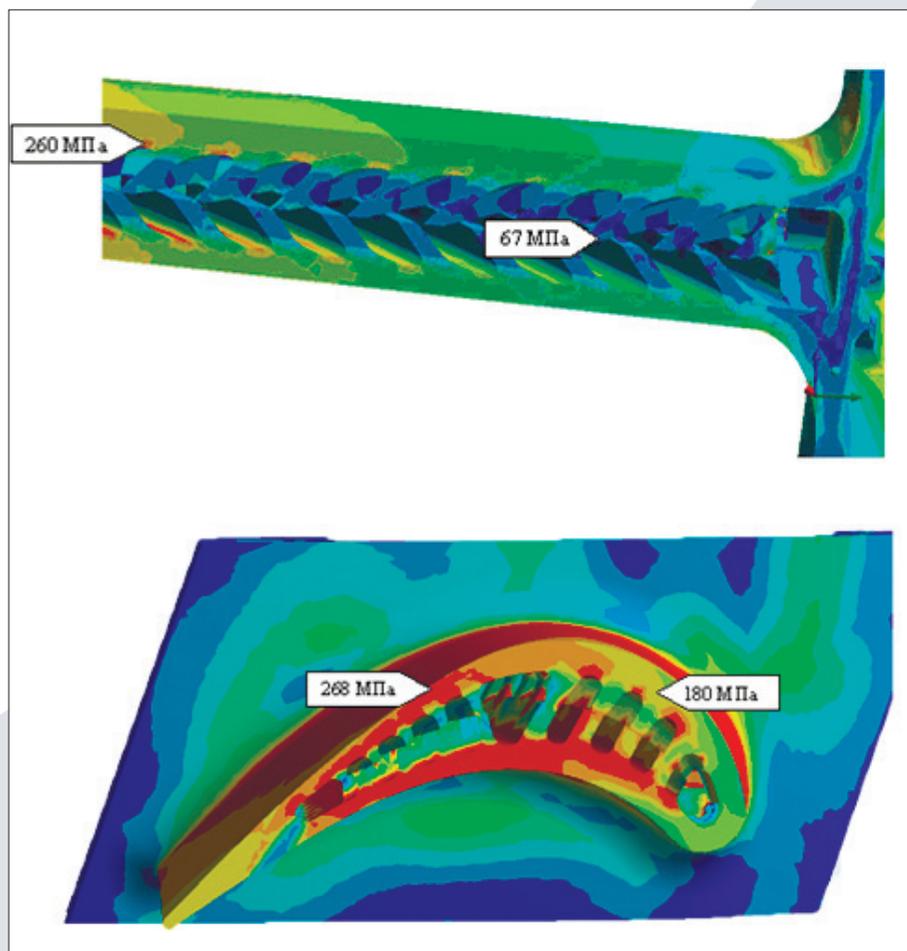
На рис. 6 приведено изменение распределения термоупругих напряжений в наиболее напряженных поперечных сечениях лопатки.

На рис. 7 показано распределение интенсивности напряжений в наиболее характерных продольных сечениях лопатки.

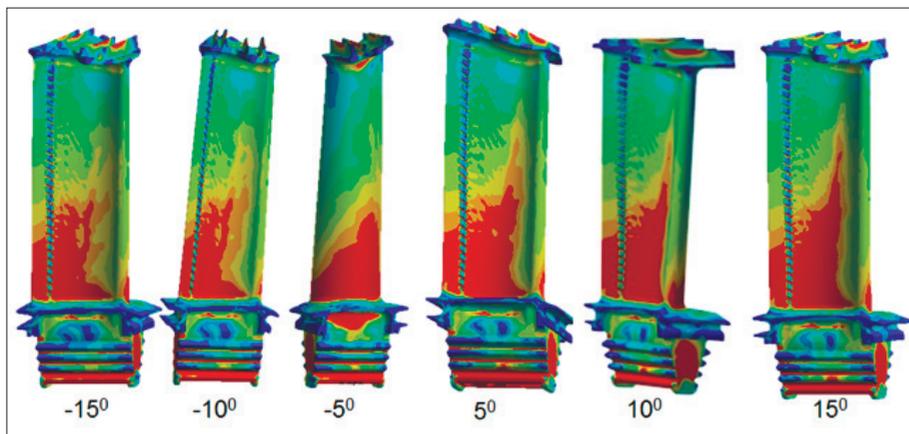
Таким образом, на рис. 5–7 приведены характерные картины распределения интенсивностей напряжений. Полученные результаты дают представление об общей картине распределения интенсивностей напряжений по объему лопатки и изменению их в зависимости

от ориентации кристаллографических осей.

Распределение напряжений по объему лопатки носят довольно сложный характер. При вихревой системе охлаждения каналы для охлаждающего воздуха расположены под углом к продольной оси лопатки. Характер распределения напряжений меняется от сечения к сечению. 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. Поэтому построить простые графические зависимости как для случая влияния ориентации кристаллографических осей на собственные частоты колебаний лопаток [13] затруднительно. Однако общие закономерности можно выявить. Целесообразно построить некоторую кривую, которая отражает изменение наибольших интенсивностей напряжений независимо



**Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений в сечениях рабочей лопатки под действием центробежных сил и температурного поля**



**Рис. 5. Изменение полей интенсивностей напряжений на поверхности лопатки при повороте кристаллографических осей от  $-150$  до  $+150$**

от места их расположения при изменении ориентации КГО (рис. 8).

Видно, что при повороте КГО  $[100]$ ,  $[010]$  вокруг оси  $[001]$ , совпадающей с осью  $z$ , наибольшие интенсивности напряжений изменяются периодически, повторяясь через  $90^\circ$ . Места локализации термоупругих напряжений часто совпадают с местами локализации вибрационных напряжений [13], что создает дополнительную опасность. Поэтому для оценки прочностной надежности охлаждаемых монокристаллических лопаток необходимо проводить комплексный анализ их динамического напряженного состояния при колебаниях и статического термоупругого состояния. Целесообразно ограничить повышение интенсивностей напряжений величиной  $320 \text{ МПа}$  (на  $30\%$ ), что соответствует повороту КГО на  $12^\circ$ – $15^\circ$ . Такие же ограничения на поворот кристаллографических осей рекомендуются для лопаток других конструкций [1, 5, 6], а также соответствуют условиям разброса собственных частот лопаток не более чем на  $8$ – $10\%$  [13].

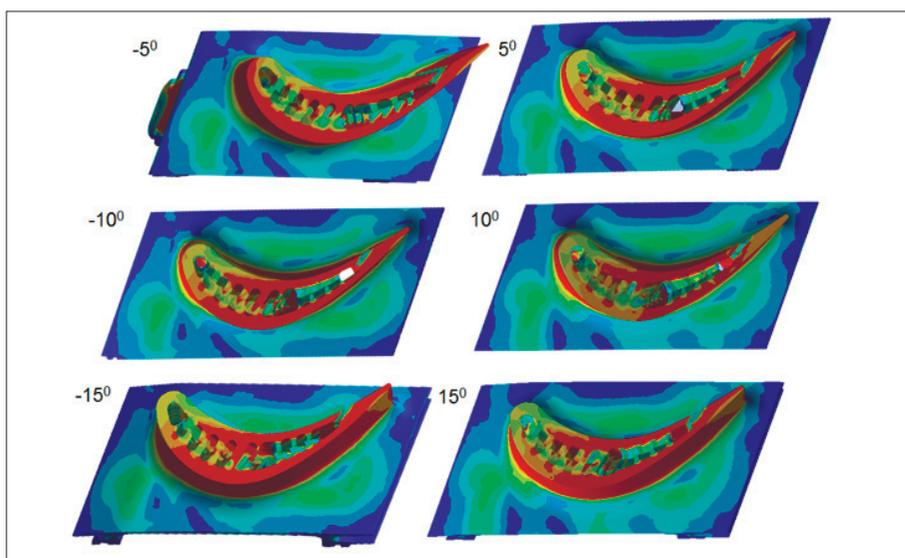
#### Выводы

В работе на основе исследование термоупругого состояния лопатки с вихревой и частично пленочной системами охлаждения и влияния изменения азимутальной ориентации кристаллографических осей на напряженно-деформированное состояние лопатки установлено:

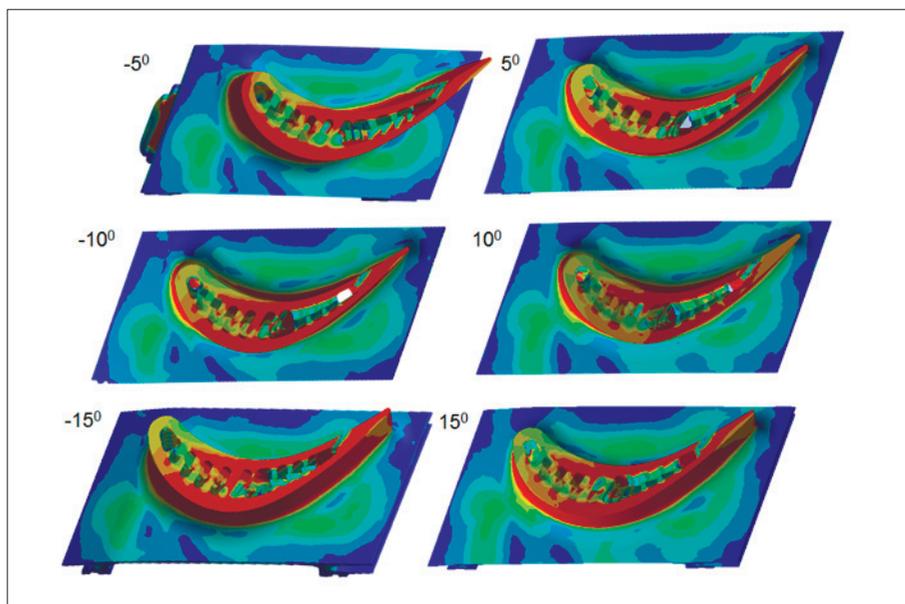
1. Когда КГО  $[100]$ ,  $[010]$ ,  $[001]$  совпадают с осями  $x$ ,  $y$ ,  $z$  наибольшие интенсивности термоупругих напряжений на поверхностях охлаждающих каналов достигают  $260 \text{ МПа}$ .

2. При повороте кристаллографических осей вокруг оси  $z$  по часовой стрелке наблюдается тенденция существенного повышения наибольших интенсивностей напряжений до  $420 \text{ МПа}$ . При этом минимальные интенсивности напряжений наоборот снижаются.

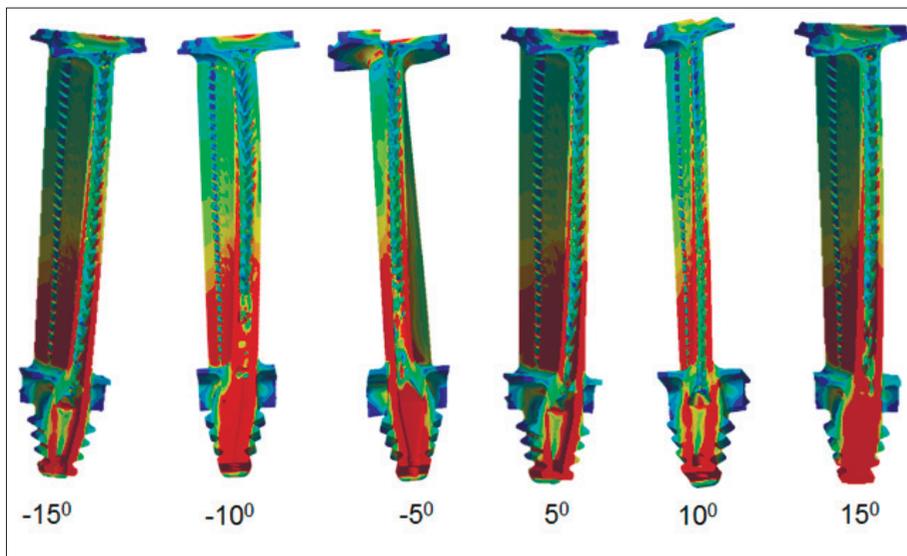
3. При повороте кристаллографических осей против часовой стрелки происходит обратный процесс. Максимальные интенсивности напряжений при этом снижаются до  $240 \text{ МПа}$ . Эти результаты могут иметь отклонения, учитывая сложность геометрических форм лопатки, температурных полей и неоднородность материала.



**Рис. 5. Изменение полей интенсивностей напряжений на поверхности лопатки при повороте кристаллографических осей от  $-15^\circ$  до  $+15^\circ$**



**Рис. 6. Изменение полей интенсивностей напряжений в поперечных сечениях лопатки при повороте кристаллографических осей от  $-15^\circ$  до  $+15^\circ$**



**Рис. 7. Изменение полей интенсивностей напряжений в продольном сечении лопатки при повороте кристаллографических осей от  $-15$  до  $+150$**

4. Общая картина НДС циклически повторяется при повороте кристаллографических осей на  $90^\circ$  (от  $-45^\circ$  до  $+45^\circ$ ), что показано в работах [5, 6] для лопаток другой конфигурации. При этом максимальные напряжения существенно изменяются, поэтому требуется вводить некоторое ограничение на отклонение КГО.

5. При изготовлении монокристаллических лопаток следует стремиться, чтобы поворот КГО в плоскости ху не превышал  $12^\circ$ – $15^\circ$ . Такие же рекомендации следуют из условия ограничения разброса собственных частот лопатки величиной  $8$ – $10\%$ .

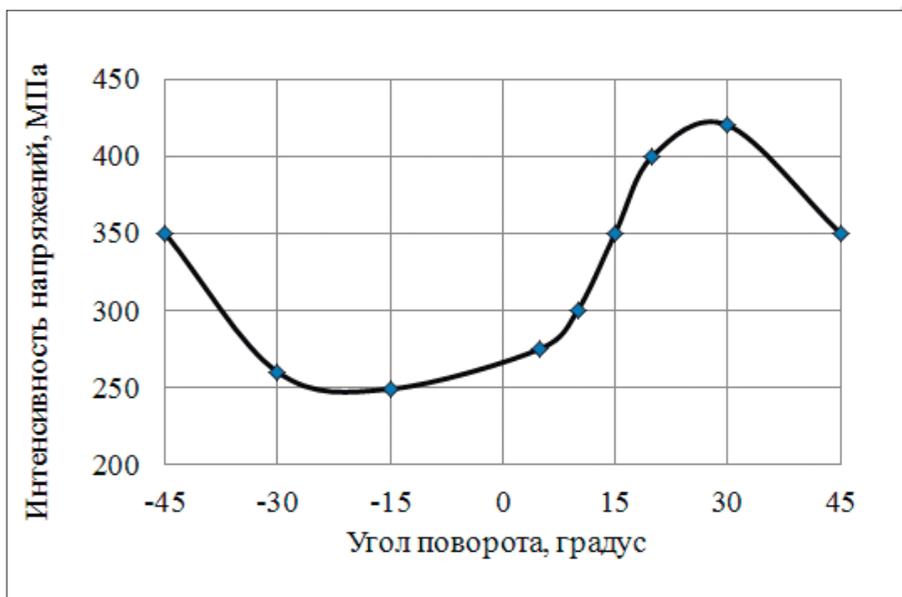
#### Список литературы:

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. – 2009. – Вып. 296. – С. 74–82.

2. Зысина-Моложан Л. М. Теплообмен в турбомашине / Л. М. Зысина-Моложан, А. В. Зысин, М. П. Поляк. – А. 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 / D. S. Wolf // AIAA Pap. – 1981. – № 1437. – 5 p.

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



**Рис. 8. Изменение наибольших интенсивностей напряжений в лопатке при повороте КГО [100], [010] вокруг оси [001]**

5. Придорожный Р. П. Влияние кристаллографической ориентации на объемное напряженно-деформированное состояние монокристаллической неохлаждаемой лопатки турбины / Р. П. Придорожный, А. В. Шереметев // 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. Шереметев, А. П. Зиньковский // Вестник двигателестроения. – 2013. – № 1. – С. 53–57.

7. Копелев С. З. Охлаждаемые лопатки газовых турбин: Расчет

и профилирование / С. З. Копелев. – М.: Наука, 1983. – 145 с.

8. Carter T. J. Common failures in gas turbine blades / T. J. Carter // Engineering Failure Analysis. – 2005. – Vol. 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.

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 // Механика та машинобудування. – 2013. – № 1 – С. 23–28.

12. Воробьев Ю. С. Особенности температурного и термоупругого состояния монокристаллической охлаждаемой лопатки ГТД / [Воробьев Ю. С., Овчарова Н. Ю., Берлизова Т. Ю. и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. – 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, R. Rzakowski] // Journal of vibration engineering & technologies. – 2014. – Vol. 2. – Issue 6. – P. 537–541.