

Влияние азимутальной ориентации кристаллографических осей на термоупругое состояние лопатки ГТД с вихревой системой охлаждения

Ю. С. Воробьев^а, Н. Ю. Овчарова^а, Р. Жондковски^б, Т. Ю. Берлизова^в

^а Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина

^б Институт проточных машин им. Р. Шевальского Польской Академии наук, Гданьск, Польша

^в Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, Украина

Рассматривается температурное и термоупругое состояние охлаждаемой монокристаллической лопатки со сложной вихревой системой охлаждения и каналами для выхода охлаждающего воздуха. Задача определения напряженно-деформированного состояния исследуемой лопатки под действием температурных полей и центробежных сил решается методом конечных элементов. Исследуется влияние азимутальной ориентации кристаллографических осей на распределение и величину термоупругих напряжений по объему лопатки.

Ключевые слова: охлаждаемая лопатка, температурные поля, термоупругие напряжения, монокристаллический материал, кристаллографические оси, азимутальная ориентация.

Введение и постановка задачи. Применение охлаждаемых рабочих лопаток газовых турбин обусловлено тем, что уровень используемых жаропрочных материалов при высоких температурах не удовлетворяет потребностям современного газотурбостроения [1]. Поэтому широко применяются различные системы охлаждения рабочих лопаток газотурбинных двигателей (ГТД). Наиболее распространены системы охлаждения с помощью внутренних каналов, через которые циркулирует охлаждающий воздух. Кроме того, используется внешнее охлаждение воздухом, поступающим через внутренние каналы и выходящим через отверстия, что создает тонкую воздушную пленку на поверхности лопатки. Такое охлаждение часто используется на части поверхности лопатки, например в области выходной кромки. Возникающие при этом в теле лопатки градиенты температуры приводят к высоким температурным напряжениям. Наибольшей статической прочностью обладают жаропрочные монокристаллические сплавы, упругие свойства которых зависят от ориентации кристаллографических осей (КГО). Сложная геометрическая форма охлаждаемых лопаток способствует возникновению концентрации и локализации напряжений [1–8]. Анализ термоупругого напряженно-деформированного состояния (НДС) таких лопаток является актуальной задачей и связан с учетом свойств монокристаллических материалов.

Основные проблемы прочностной надежности монокристаллических рабочих лопаток при высоких температурах газового потока рассмотрены в работе [1] на основе результатов экспериментальных и теоретических исследований. Общие свойства монокристаллических никелевых жаропрочных сплавов и их зависимость от ориентации КГО анализируются в работе [2]. В [3] изучено изменение НДС монокристаллической неохлаждаемой лопатки от расположения КГО. Результаты подробных исследований зависимости НДС по объему монокристаллической рабочей лопатки ГТД с системой прямых охлаждающих каналов от ориентации КГО, включая азимутальную, представлены в [4–7]. Влияние азимутальной ориентации на распределение напряжений в системе перфорационных отверстий в монокристаллической охлаждаемой лопатке рассмотрено в работе [8]. Особенности температурного состояния охлаждаемых лопаток изучены в [9, 10]. Результаты этих исследований свиде-

тельствуют о существенном влиянии конструктивных особенностей лопатки и ориентации КГО на термоупругое НДС монокристаллической лопатки. Ранее [11, 12] изучалось термоупругое состояние монокристаллической лопатки с новой вихревой системой охлаждения в конкретном температурном поле при постоянном положении кристаллографических осей. Однако хорошо известно, что изменение положения КГО существенно влияет на распределение и величину термоупругих напряжений. Поэтому цель данной работы заключается в исследовании влияния изменения азимутальной ориентации КГО на термоупругое напряженно-деформированное состояние лопатки с вихревой системой охлаждения, что в настоящее время является актуальным.

Объект исследования и его расчетная модель. Рассматривается охлаждаемая монокристаллическая лопатка с эффективной, но сложной системой вихревого охлаждения. На рис. 1 показаны лопатка, система охлаждающих каналов, расположение КГО и направление 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 приводит к температурному расширению лопаток и высоким температурным напряжениям. Поэтому необходимо решить взаимосвязанные задачи определения температурного и термоупругого состояния охлаждаемой монокристаллической лопатки.

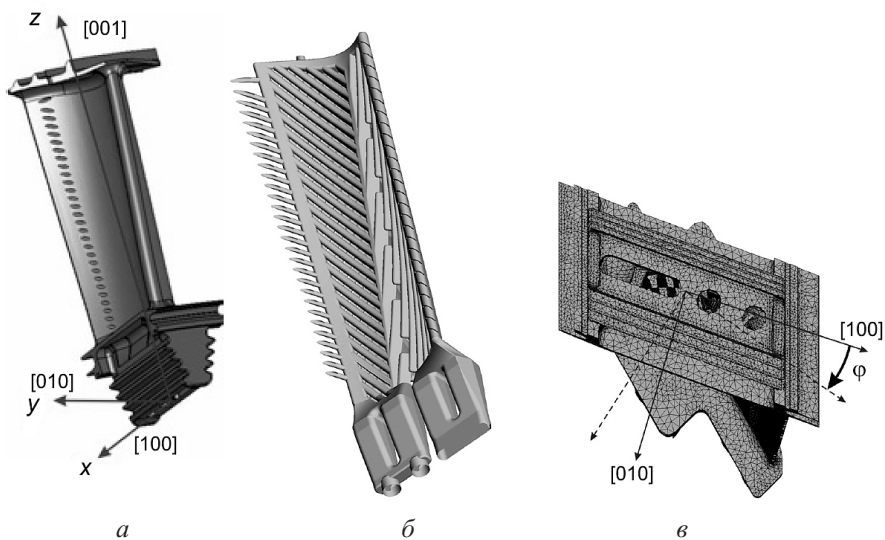


Рис. 1. Охлаждаемая лопатка с обозначением монокристаллических осей (а), система внутренних охлаждающих каналов в виде вихревой матрицы (б) и направление поворота КГО (в).

В общем случае определение температурного состояния охлаждаемой лопатки представляет краевую задачу математической физики в трехмерном пространстве. Процесс теплопроводности описывается нелинейным дифференциальным уравнением в частных производных:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c T) = \text{div}(\lambda \text{grad } T) + Q, \quad (1)$$

где T – температура; λ – коэффициент теплопроводности; c – удельная теплоемкость; Q – характеристика внутреннего источника или стока; ρ – плотность материала лопатки; t – время.

Данная лопатка имеет перепад температур как в продольном направлении, так и в поперечных сечениях. Поэтому задача должна решаться как трехмерная. Для подобных задач могут быть использованы граничные условия I и III рода [9, 10]. Если задано распределение температур на поверхностях лопатки и охлаждающих каналов, можно использовать граничные условия I рода. Однако такие данные известны не всегда и получить их с достаточной степенью точности обычно очень сложно. Граничные условия III рода отражают конвективный теплообмен на поверхностях лопатки и охлаждающих каналов. Их использование также связано с возможностью погрешности, поэтому задача температурного состояния лопатки решалась двумя способами, а сопоставление данных позволило получить более адекватные результаты.

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

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

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – компоненты нормальных напряжений; $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ – компоненты касательных напряжений; α – коэффициент теплового расширения; X, Y, Z – компоненты массовых сил; E, ν – упругие константы, которые зависят от температуры и ориентации кристаллографических осей.

Сложность геометрии лопатки и неоднородность материала как исходная, так и возникающая в температурном поле требуют выбора вида и размера конечного элемента. Поэтому исследовали несколько моделей лопатки с разной густотой сетки и типом конечных элементов, а следовательно, числом степеней свободы (таблица).

Характеристика использованных конечных элементов моделей охлаждаемой лопатки

Тип конечного элемента	Число узлов	Число степеней свободы
Линейный тетраэдр (4-узловой)	83910	242367
	132908	382806
	244713	702561
	436228	1264614
Квадратичный тетраэдр (10-узловой)	580031	1704114
	935793	2747526
	1072656	3217968
	1739242	> 7500000
	3117290	> 9000000

Конечные элементы в виде тетраэдров обеспечивают более точное описание геометрии лопатки. Установлено, что, начиная с числа степеней свободы 3217968, значения определяемых характеристик НДС лопатки не меняются. Поэтому для решения

задачи была выбрана конечноэлементная модель лопатки из десяти узловых тетраэдров с таким числом степеней свободы. При этом минимальный размер конечного элемента составляет $3,7713 \cdot 10^{-5}$ мм, что достаточно для описания всех конструктивных особенностей лопатки и полей напряжений.

Численный анализ температурного и термоупругого состояния лопатки. В качестве исходных данных были заданы температуры на различных участках лопатки, которые изменялись в интервале $580...810^\circ\text{C}$. С помощью осреднения данных получено температурное поле лопатки. Кроме того, решалась задача теплопроводности для случая, когда температура газа на поверхности лопатки составляла 850°C , а температура охлаждающего воздуха на входе в систему охлаждения – 600°C , что соответствует рабочему режиму лопатки. В нашем случае рассматривается стационарная задача теплопроводности, которая сводится к решению вариационного уравнения $\delta J = 0$ для функционала

$$J = \frac{1}{2} \iiint_V \lambda \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz + \frac{1}{2} \sum_k \iint_{(S_k)} h_k (T - T_k)^2 dS_k, \quad (3)$$

где V – объем тела; S_k – поверхность участков лопатки и охлаждающих каналов; h_k – коэффициент теплоотдачи на участках лопатки; k – номер поверхности участков лопатки и охлаждающих каналов.

Вариационное уравнение (3) соответствует уравнению теплопроводности и граничным условиям III рода на разных участках лопатки охлаждающих каналов:

$$h_k (T_{гk} - T) = \lambda \frac{\partial T}{\partial n};$$

$$h_k (T - T_{вk}) = \lambda \frac{\partial T}{\partial n},$$

где $T_{гk}$ – температура газа; $T_{вk}$ – температура воздуха на разных участках охлаждающих каналов; n – нормаль к поверхности лопатки или охлаждающих каналов.

Температура охлаждающего воздуха на разных участках каналов выбирается согласно исходным данным.

Наиболее распространенным является определение среднего значения коэффициента теплоотдачи от рабочего тела к лопатке на трех участках: на входной кромке h_1 ; на средней части профиля h_2 (против охлаждающих каналов) и выходной кромке h_3 ; на поверхности охлаждающих каналов $h_{вк}$. При отсутствии достаточной информации о характере теплообмена используются средние интегральные значения коэффициентов теплоотдачи, найденные по эмпирическим зависимостям [9, 10].

Решение температурной задачи на основе уравнения (3) с граничными условиями III рода позволило получить распределение температуры по объему лопатки. Заданное температурное поле сравнивалось с полученным при решении задачи теплопроводности, и результаты осреднялись. Полученное температурное поле в продольном и поперечном сечениях лопатки иллюстрирует рис. 2. Как видно, наибольшие градиенты температур наблюдаются в поперечном сечении, они существенно выше таковых по длине лопатки. Знание температурного поля позволяет определить линейные изменения лопатки. Изменение размеров лопатки в продольном направлении соответствует заданной величине зазоров в лабиринтном уплотнении и практически не зависит от ориентации КГО.

Характер матриц податливости для рассматриваемой задачи с учетом свойств монокристаллического материала описан в работах [2, 11, 12]. Решение задачи термо-

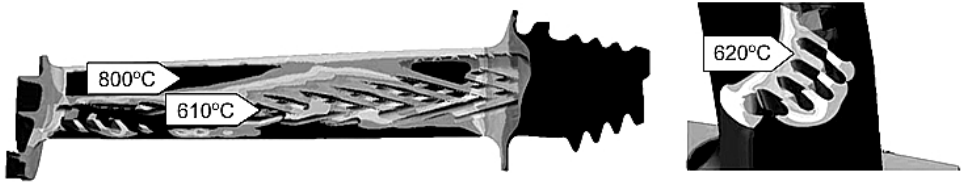


Рис. 2. Распределение температуры в различных сечениях лопатки.

упругости позволяет проанализировать НДС лопатки. Полученные результаты сравнивались с данными, определенными только под действием центробежных сил. В общем случае матрица податливости для монокристаллической лопатки является полностью заполненной [2]. Тогда кристаллографические оси [100], [010], [001] совпадают с осями лопатки x , y , z . При этом матрица податливости имеет вид

$$S = K^{-1} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{12} & s_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где S – матрица податливости; K – матрица жесткости; s_{ij} – коэффициенты матрицы податливости.

Зависимости коэффициентов матрицы податливости (4) от температуры T для монокристаллической лопатки могут быть представлены так:

$$\begin{cases} s_{11} = h_{11} + h_{12}T + h_{13}T^2; \\ s_{12} = h_{21} + h_{22}T + h_{23}T^2; \\ s_{44} = h_{31} + h_{32}T + h_{33}T^2, \end{cases} \quad (5)$$

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

Как было показано ранее [11, 12], центробежные силы вызывают наибольшую интенсивность напряжений $\max \sigma_{in}$ (порядка 1 МПа), в то время как максимальная интенсивность термоупругих напряжений $\max \sigma_{it}$ составляет примерно 450 МПа. Причем наблюдается большая неоднородность распределения напряжений и их локализация, особенно на поверхности охлаждающих каналов и отверстий для выхода охлаждающего воздуха. Известно, что азимутальная ориентация КГО существенно влияет на распределение полей напряжений [4–7]. В данном случае исследовалось влияние поворота КГО в плоскости xu вокруг оси z , соответствующей кристаллографической оси [001], которое определяется углом φ (рис. 1).

На рис. 3 приведено характерное распределение интенсивности напряжений на поверхности лопатки при двух положениях КГО. Видно общее снижение интенсивности термоупругих напряжений от корня к периферии и существенное изменение полей напряжений при повороте КГО. Кроме того, наблюдается локализация напряжений вблизи отверстий для выхода охлаждающего воздуха. Это обусловлено тем, что наличие отверстий хотя значительно и снижает температуру у выходной кромки

лопатки, все же вызывает существенные ее градиенты и местное повышение интенсивности напряжений. При этом порядок напряжений от центробежных сил не меняется.

На рис. 4 показано распределение термоупругих напряжений в наиболее напряженном поперечном сечении лопатки на расстоянии трети длины от корня при различных положениях КГО. В этом сечении лопатки отмечаются большие градиенты интенсивности напряжений и локализация их на поверхности охлаждающих каналов.

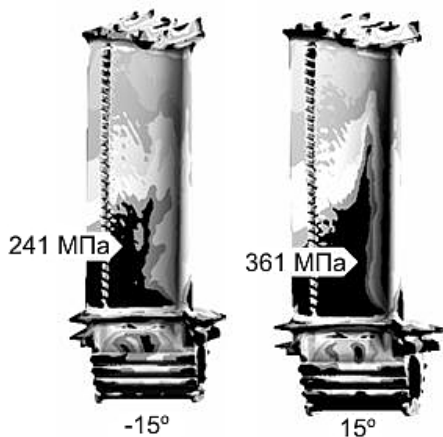


Рис. 3. Изменение полей интенсивности напряжений на поверхности лопатки при различном положении КГО.

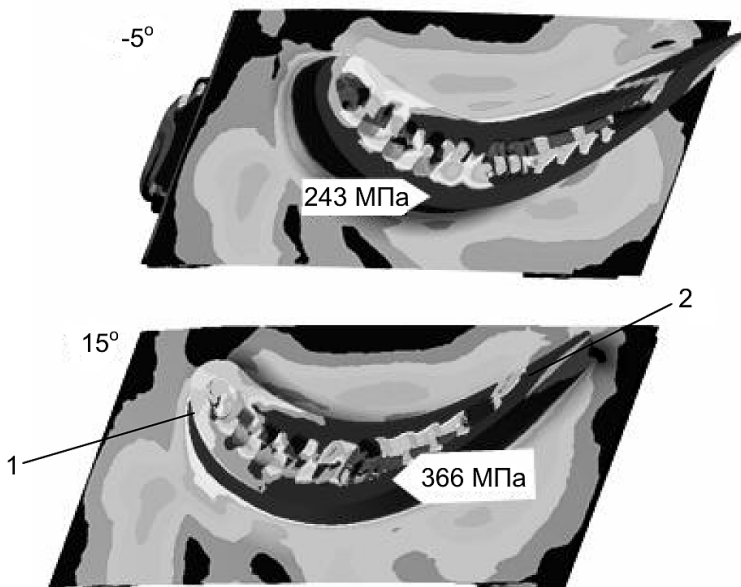


Рис. 4. Изменение полей интенсивности напряжений в поперечном сечении лопатки при различном положении КГО: 1, 2 – соответственно входная и выходная кромки сечения лопатки.

Из приведенных на рис. 3 и 4 данных видно, что наибольшие градиенты напряжений в поперечном сечении выше таковых в продольном направлении. Полученные результаты дают представление об общей картине распределения интенсивности напряжений.

ности напряжений по объему лопатки и изменении их в зависимости от ориентации КГО. Характер распределения напряжений по объему лопатки довольно сложный и меняется от сечения к сечению. При вихревой системе охлаждения каналы для охлаждающего воздуха расположены под углом к продольной оси лопатки. При изменении ориентации КГО происходит перераспределение напряжений и изменение НДС лопатки. Поскольку наибольшие интенсивности напряжений при этом могут наблюдаться в новой области лопатки, они будут зависеть также от геометрических особенностей этой области и ее температуры. Поэтому графически построить простые зависимости как для случая влияния ориентации КГО на собственные частоты колебаний лопаток [13] затруднительно. Однако общие закономерности можно выявить. Целесообразно построить некоторую кривую, которая отражает изменение наибольших интенсивностей напряжений независимо от их местоположения при изменении ориентации КГО (рис. 5). Видно, что при повороте КГО [100], [010] вокруг оси [001], совпадающей с осью z , наибольшие интенсивности напряжений изменяются периодически, повторяясь через $\varphi = 90^\circ$.

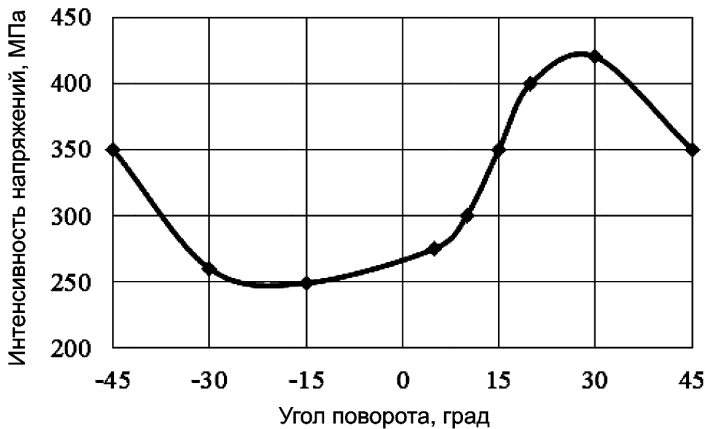


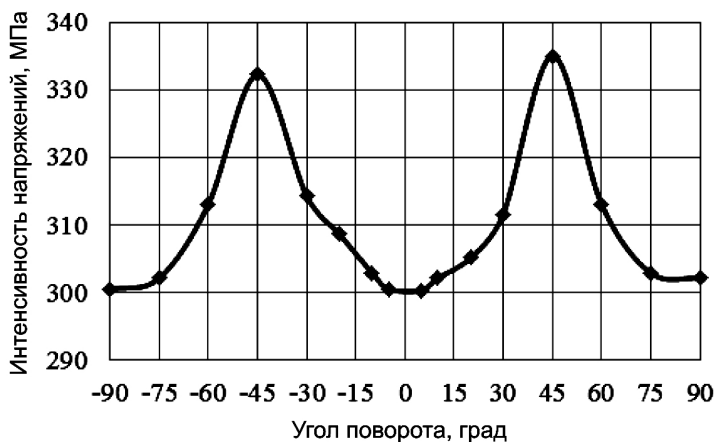
Рис. 5. Изменение наибольших интенсивностей напряжений в лопатке при повороте КГО [100], [010] вокруг оси [001].

При совпадении КГО [100], [010], [001] с осями x , y , z наибольшие интенсивности термоупругих напряжений на поверхностях охлаждающих каналов достигают 260 МПа. При повороте КГО вокруг оси z по часовой стрелке наблюдается тенденция существенного повышения наибольших интенсивностей напряжений до 420 МПа. При этом минимальные интенсивности напряжений, наоборот, снижаются. При повороте КГО против часовой стрелки происходит обратный процесс, а максимальные интенсивности напряжений снижаются до 240 МПа. Учитывая сложность геометрических форм лопатки, температурных полей и неоднородность материала, возможны отклонения от данной тенденции. Общая картина НДС циклически повторяется при повороте КГО на 90° , что показано в работах [4–7] для лопаток с системой прямых охлаждающих каналов.

Представляет также интерес анализ изменения интенсивности напряжений в некоторых характерных точках поперечного сечения лопатки при повороте КГО вокруг оси z . Такие точки выбраны вблизи входной и выходной кромок сечения лопатки (рис. 4). Причем точка 2 (рис. 4) расположена возле отверстия для выхода охлаждающего воздуха. На рис. 6 показана зависимость интенсивности напряжений в точках 1, 2 (рис. 4) от азимутальной ориентации КГО. Как видно, максимумы напряжений в данных точках наблюдаются при $\varphi = 75$ и 45° соответственно.



a



b

Рис. 6. Изменение интенсивности напряжений в точках 1 (a) и 2 (б) сечения лопатки (рис. 4) при повороте КГО [100], [010] вокруг оси [001].

В обоих случаях наибольшие напряжения не превышают максимальных (рис. 5).

Наибольшая интенсивность напряжений с учетом воздействия температурных полей и центробежных сил составляет 420 МПа. Это значительно ниже статического предела прочности монокристаллических материалов при температуре 800°C [2]. При этом наибольшие интенсивности напряжений отмечаются в местах максимальных градиентов температур. Как правило, это поверхности охлаждающих каналов и отверстий для выхода охлаждающего воздуха. Места локализации термоупругих напряжений часто совпадают с таковыми вибрационных напряжений [13], что создает дополнительную опасность. Поэтому для оценки прочностной надежности охлаждаемых монокристаллических лопаток необходимо проводить комплексный анализ динамического напряженного состояния при колебаниях и статического термоупругого состояния. Целесообразно ограничить повышение интенсивности напряжений уровнем 320 МПа (на 30%), что соответствует повороту КГО на 12...15° [1]. При этом интенсивность напряжений в характерных точках возле входной 1 и выходной 2 кромок (рис. 4) имеет наименьшие значения (рис. 6). Такие же ограничения на поворот КГО рекомендуются для лопаток других конструкций [1, 4–8], причем они соответствуют условиям разброса собственных частот лопаток не более чем на 8...10% [1, 6, 7, 13].

Заключение. 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 охлаждаемой лопатки вносят термоупругие напряжения. Напряжения от центробежных сил достигают значительно меньших значений при повороте КГО. Однако суммарные максимальные интенсивности напряжений существенно ниже статического предела прочности монокристаллических материалов.

Термоупругие напряжения, контроль которых затруднен, соответствуют величине напряжений на поверхности лопатки, что позволяет проводить контроль и диагностику максимальных напряжений.

Азимутальная ориентация кристаллографических осей оказывает существенное влияние на НДС лопатки. Общая картина НДС циклически повторяется при повороте КГО на 90°. При этом максимальные напряжения значительно изменяются, поэтому требуется некоторое ограничение на отклонение КГО. При изготовлении монокристаллических лопаток необходимо стремиться к тому, чтобы поворот КГО в плоскости χ не превышал 12...15°. Такие же рекомендации следуют из условия ограничения разброса собственных частот лопатки уровнем 8...10%. Следует стремиться к сглаживанию поверхности угловых форм в охлаждающих каналах и отверстиях для выхода охлаждающего воздуха. Окончательные требования к изготовлению конкретных охлаждаемых лопаток могут быть выработаны совместно с представителями научных организаций и промышленных предприятий [6, 7, 12, 13].

Резюме

Розглядається температурний і термопружний стан охолоджуваної монокристалічної лопатки зі складною вихровою системою охолодження і каналами для виходу охолоджуючого повітря. Задача визначення напружено-деформованого стану досліджуваної лопатки під дією температурних полів і відцентрових сил розв'язується методом скінченних елементів. Досліджується вплив азимутальної орієнтації кристаллографічних осей на розподіл і величину термопружних напружень по об'єму лопатки.

1. *Ножницкий Ю. А., Голубовский Е. Р.* О прочностной надежности монокристаллических рабочих лопаток высокотемпературных турбин перспективных ГТД // Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования: Тр. ЦКТИ. – 2009. – Вып. 296. – С. 74–82.
2. *Шалин Р. Е., Светлов И. Л., Качанов Е. Б. и др.* Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
3. *Воробьев Ю. С., Гецов Л. Б., Мельников Б. Е., Семенов А. С.* Проблемы вибрационного состояния фундаментов, сейсмостойкости и прочности турбомашин. Ч. 2 // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. – 2013. – № 1-4 (183). – С. 302–319.
4. *Придорожний Р. П.* Расчетное исследование объемного напряженно-деформированного состояния монокристаллической охлаждаемой лопатки турбины // Авиаци.-косм. техника и технология. – 2002. – Вып. 34. – С. 119–123.
5. *Придорожний Р. П., Шереметьев А. В.* Влияние кристаллографической ориентации на объемное напряженно-деформированное состояние монокристаллической неохлаждаемой лопатки турбины // Вестн. двигателестроения. – 2003. – № 1. – С. 47–51.
6. *Придорожний Р. П., Шереметьев А. В., Зиньковский А. П.* Влияние кристаллографической ориентации на спектр собственных частот и форм колебаний монокристаллических рабочих лопаток турбин // Там же. – 2006. – № 2. – С. 42–48.

7. Придорожный Р. П., Шереметьев А. В., Зиньковский А. П. Влияние кристаллографической ориентации на спектр собственных колебаний и предел выносливости монокристаллических рабочих лопаток турбин // Пробл. прочности. – 2008. – № 5. – С. 15–27.
8. Придорожный Р. П., Шереметьев А. В., Зиньковский А. П. Оценка влияния азимутальной ориентации на напряженность монокристаллической охлаждаемой лопатки в системе перфорационных отверстий // Вестн. двигателестроения. – 2013. – № 1. – С. 53–57.
9. Копелев С. З. Охлаждаемые лопатки газовых турбин: Расчет и профилирование. – М.: Наука, 1983. – 145 с.
10. Зысина-Моложен Л. М., Зысин Л. В., Поляк М. П. Теплообмен в турбомашинах. – Л.: Машиностроение, 1974. – 336 с.
11. Жондовски Р., Воробьев Ю. С., Овчарова Н. Ю., Евченко Т. Ю. Анализ термоупругого состояния охлаждаемой монокристаллической лопатки ГТД // Механіка та машинобудування. – 2013. – № 1. – С. 23–28.
12. Воробьев Ю. С., Овчарова Н. Ю., Берлизова Т. Ю. и др. Особенности температурного и термоупругого состояния монокристаллической охлаждаемой лопатки ГТД // Авиаци.-косм. техника и технология. – 2014. – № 10 (117). – С. 75–78.
13. Vorobiov Iu. S., Dyakonenko K. Yu., Kulishov S. B., et al. Vibration characteristics of cooled single-crystal gas turbine blades / J. Vibr. Eng. Technol. – 2014. – 2, No. 6. – P. 537–541.

Поступила 10. 11. 2015