

УДК 629.7.036:539.4

Р.П. ПРИДОРЖНЫЙ¹, А.В. ШЕРЕМЕТЬЕВ¹, А.П. ЗИНЬКОВСКИЙ²

¹ГП «Ивченко-Прогресс», Украина

²Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Украина

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ АЗИМУТАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ НА НАПРЯЖЕННОСТЬ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОХЛАЖДАЕМЫХ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН

В работе с помощью наиболее широко применяемых на сегодняшний день моделей пластического деформирования и разрушения монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов и подходов для анализа напряженного состояния монокристаллических лопаток проведено расчетное исследование влияния азимутальной кристаллографической ориентации на напряженное состояние монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбин. Установлено, что азимутальная кристаллографическая ориентация может оказывать существенное влияние на напряженное состояние монокристаллических охлаждаемых лопаток турбин. Однако показано, что ее влияние в различных зонах лопаток существенно зависит от применяемой модели пластического деформирования и разрушения монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов и подхода для анализа напряженного состояния.

Ключевые слова: охлаждаемая рабочая лопатка, монокристаллический жаропрочный никелевый сплав, азимутальная кристаллографическая ориентация, расчетная модель, вычислительный эксперимент, напряженное состояние, концентрация напряжений, рациональный выбор.

Введение и постановка задачи

В практике создания монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбин, работающих в условиях высоких температур и нагрузок, широко применяются литейные жаропрочные никелевые сплавы. Они относятся к дисперсионно-твердеющему классу и наследуют кристаллическую решетку никеля, являющегося основным компонентом их состава, которая представляет собой гранецентрированный куб, в центре каждой грани которого находится еще по одному атому никеля. Поэтому, в отличие от изотропных материалов, вследствие существования направлений и плоскостей, различающихся по плотности заполнения атомами, свойства монокристаллов анизотропны и зависят от кристаллографических направлений.

Определяющим требованием при отливке монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбин является совпадение их продольной оси с главным кристаллографическим направлением $\langle 001 \rangle$ монокристалла, определяющим его аксиальную ориентацию, что достигается с помощью затравочного монокристалла. При этом допускается отклонение продольной оси лопатки от указанного направления на угол не более 10° . Положение же главных осей монокристалла в поперечном сечении лопатки,

характеризующего его азимутальную ориентацию, как правило, не контролируется.

Если изучению влияния аксиальной ориентации на напряженность монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток посвящено много работ [1-3], то анализ научно-технической литературы показывает, что относительно азимутальной ориентации такие исследования практически отсутствуют. Учитывая анизотропию физических и механических свойств жаропрочных никелевых сплавов, следует ожидать, что при ее изменении напряженное состояние рассматриваемых лопаток при одинаковых условиях нагружения будет различно. Поэтому актуальной научно-технической задачей по повышению надежности и долговечности монокристаллических рабочих лопаток является проведение исследований по выбору рациональной азимутальной кристаллографической ориентации. Одним из эффективных способов решения этой задачи является вычислительный эксперимент с использованием существующих подходов к моделированию объектов исследования и анализа их напряженного состояния.

Таким образом, целью данной работы является расчетное определение влияния азимутальной кристаллографической ориентации на напряженное состояние монокристаллических

охлаждаемых рабочих лопаток турбин и разработка рекомендаций по ее рациональному выбору.

1. Подходы к моделированию монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбин и анализу их напряженного состояния

В предыдущих работах [4-6] однозначно установлено, что наиболее достоверные расчетные результаты по установлению напряженного состояния современных рабочих лопаток турбин, которые характеризуются сложными геометрическими формами и наличием систем охлаждения могут быть получены с применением метода конечных элементов в трехмерной постановке. Поэтому в данной работе использовались трехмерные конечноэлементные расчетные модели монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбин. Для анализа напряженного состояния рассматриваемых лопаток использовались два, наиболее

широко применяемых на сегодняшний день, подхода. Первый – это простой феноменологический подход [3], основанный на допущении, что монокристаллы жаропрочных никелевых сплавов являются непрерывной анизотропной средой. В этом случае для расчетной оценки статической прочности монокристаллических лопаток в стационарных условиях статического нагружения применяется метод, базирующийся на теории пластического течения Хилла, который предложил модификацию условия начала текучести Мизеса в виде квадратичной формы в пространстве напряжений применительно к монокристаллам жаропрочных никелевых сплавов, имеющих три ортогональные плоскости симметрии. Согласно этому подходу выражение для эквивалентных напряжений в монокристаллах с кубической симметрией, когда продольная ось монокристаллической лопатки совпадает с направлением <001>, выражение для эквивалентного напряжения принимает следующий вид:

$$\sigma_{ea} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2]} + K_R(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2). \quad (1)$$

Здесь σ_{ij} – компоненты тензора напряжений в системе координат, связанной с главными кристаллографическими направлениями <100>, <010>, <001>; K_R – коэффициент анизотропии длительной статической прочности:

$$K_R = 4 \left(\frac{\sigma_{R<001>}}{\sigma_{R<011>}} \right)^2 - 1, \quad (2)$$

где $\sigma_{R<001>}$ и $\sigma_{R<011>}$ – пределы длительной статической прочности монокристаллического сплава при растяжении в направлении <001> и <011> соответственно.

В предположении изотропности материала выражение (1) приобретает вид [7]:

$$\sigma_{ei} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2]} + 3(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2). \quad (3)$$

Второй подход [8] основан на результатах фрактографических исследований поверхностей излома монокристаллов, которые показывают, что основным механизмом пластической деформации и разрушения монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов является трансляционное скольжение, сопровождающееся появлением сколов на поверхности излома. Это соответствует представлению об определяющем влиянии сдвига в «слабых» системах скольжения монокристалла, по которым сопротивление разрушению существенно меньше, чем в других направлениях. При этом деформация происходит не одновременно по всем кристаллографическим плоскостям и направлениям, а по тем, которые наиболее благоприятно ориентированы относительно направления действия внешней нагрузки. Пластическая деформация монокристаллов никелевых сплавов осуществляется в основном в

октаэдрических системах скольжения, т. е. в направлениях плотной упаковки атомов <011>, лежащих в плотноупакованных плоскостях {111}, которые в совокупности образуют двенадцать различных октаэдрических систем скольжения. В случае объемного напряженного состояния касательные напряжения, приведенные к действующим системам скольжения <011>{111} в монокристаллах жаропрочных никелевых сплавах, вычисляются по формуле [9]:

$$\tau_{прив} = \sum_i \sum_j \sigma_{ij} F_{ij}, \quad (4)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений в системе координат, связанной с главными кристаллографическими направлениями в монокристалле <100>, <010> и <001>;

$F_{ij} = \cos \lambda_i \cos \psi_j$ – фактор Шмида, соответствующий данной компоненте тензора на-

пряжений и системе скольжения; λ_i – угол между i -м кристаллографическим направлением и нормалью к плоскости скольжения, ψ_j – угол между j -м кристаллографическим направлением и направлением скольжения.

Эта операция проводится для всех действующих систем скольжения, вследствие которой и определяются максимальное приведенное касательное напряжение τ_{max} и система скольжения, по которой с наибольшей вероятностью будет происходить разрушение.

2. Результаты вычислительных экспериментов

С использованием изложенных выше подходов к анализу напряженного состояния был проведен комплекс расчетов по определению влияния азимутальной кристаллографической ориентации на напряженность монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбин.

Все расчеты проводились на установленном (стационарном) максимальном взлетном режиме двигателя в упругопластической постановке без учета ползучести материала. При этом предполагалось, что продольная ось лопатки со-

падает с кристаллографическим направлением $\langle 001 \rangle$ монокристалла. Поэтому для решения задачи главное направление $\langle 001 \rangle$ монокристалла было зафиксировано вдоль продольной оси монокристаллической лопатки, как показано на рис. 1. Таким образом, положение двух других главных осей монокристалла x , y в плоскости поперечного сечения, относительно осей лопатки x' , y' определялось углом ϕ .

По результатам вычислительных экспериментов определялись окружные распределения относительных эквивалентных напряжений $\bar{\sigma}_{ei} = \frac{\sigma_{ei}}{(\sigma_{ei})_{min}}$ и $\bar{\sigma}_{ea} = \frac{\sigma_{ea}}{(\sigma_{ea})_{min}}$, а также максимальных приведенных касательных напряжений $\bar{\tau}_{max} = \frac{\tau_{max}}{(\tau_{max})_{min}}$ от угла азимутальной ориентации ϕ в наиболее напряженных точках исследуемых лопаток, где $(\sigma_{ei})_{min}$, $(\sigma_{ea})_{min}$ и $(\tau_{max})_{min}$ – минимальные значения эквивалентных и максимальных приведенных касательных напряжений, определенных в диапазоне изменения азимутальной ориентации.

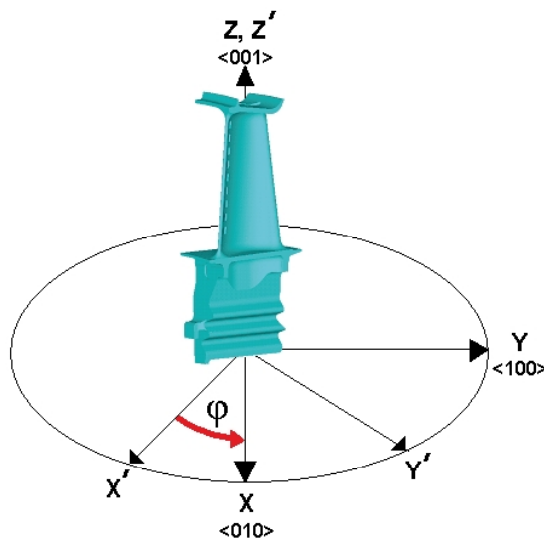


Рис. 1. Системы декартовых координат, описывающих положение главных осей монокристалла (xyz) относительно осей лопатки ($x'y'z'$)

На рис.2 показаны наиболее опасные зоны монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток с точки зрения их прочности: перфорационные отверстия на входной кромке (a); щелевые отверстия на выходной кромке (b); отверстия перетекания воздуха между охлажда-

ющими каналами (θ); переход пера в бандажную полку (z), хвостовик лопатки (d).

Полученные окружные распределения выбранных характеристик напряженного состояния монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбин приведены на рис. 3.

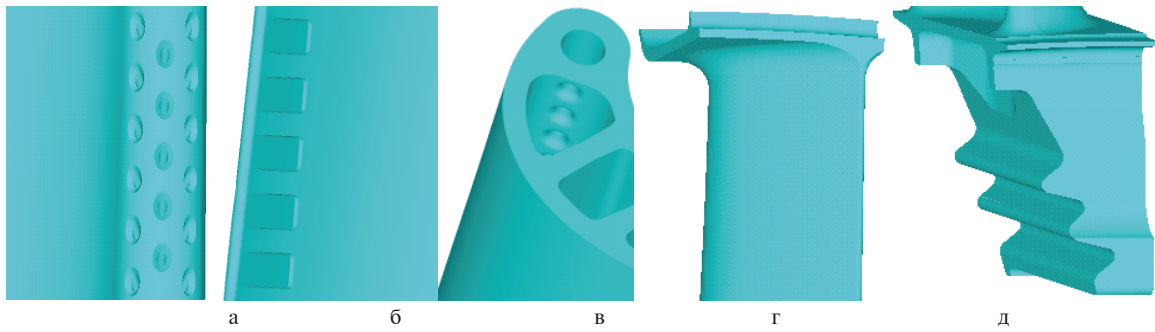


Рис. 2. Фрагменты монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбины с наиболее опасными зонами с точки зрения прочности: перфорационные отверстия на входной кромке лопатки (а), щелевые отверстия на выходной кромке лопатки (б), перетекания воздуха между охлаждающими каналами (в), переход пера в бандажную полку (г), елочное соединение лопатки (д)

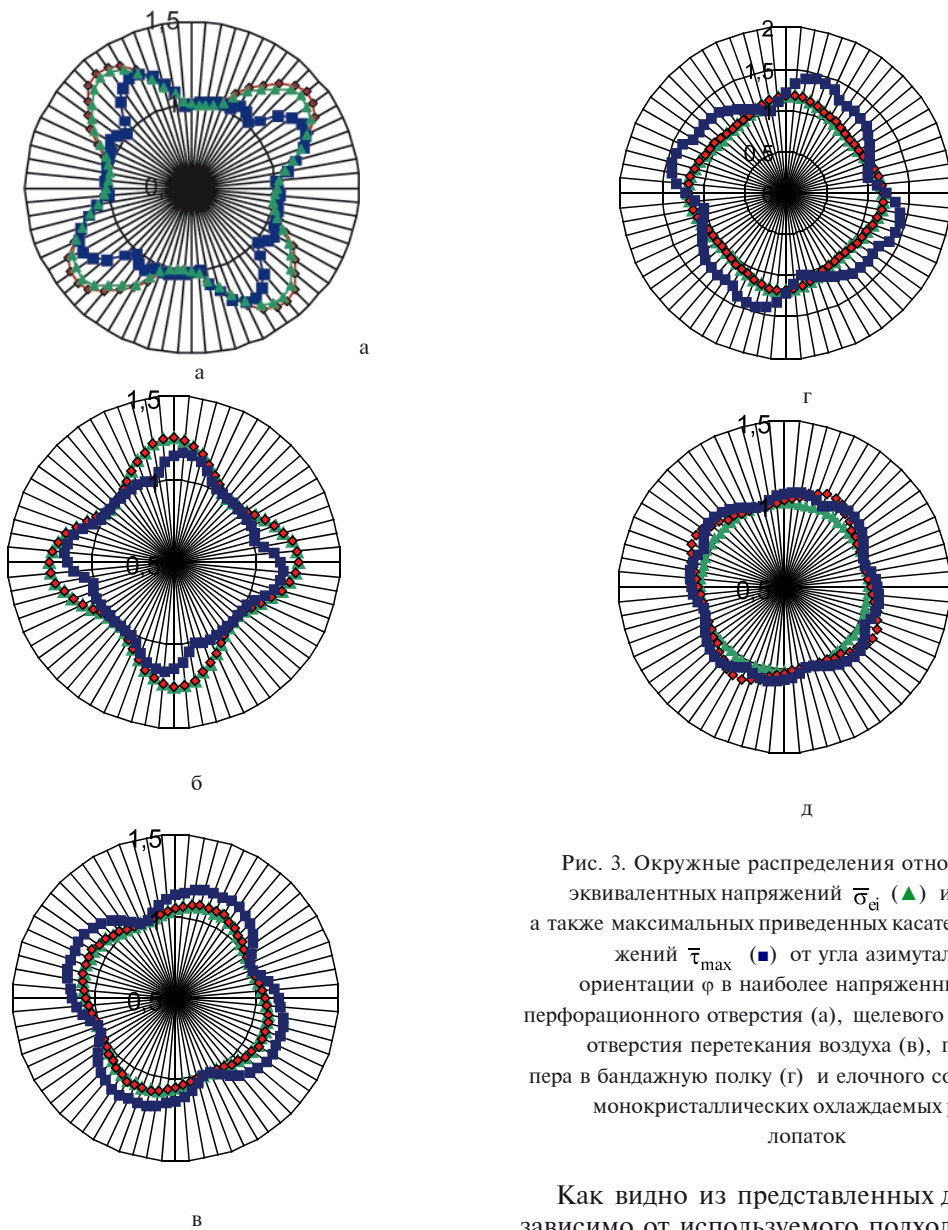


Рис. 3. Окружные распределения относительных эквивалентных напряжений $\bar{\sigma}_{\text{ср}}$ (\blacktriangle) и $\bar{\sigma}_{\text{св}}$ (\blacklozenge), а также максимальных приведенных касательных напряжений $\bar{\tau}_{\text{max}}$ (\blacksquare) от угла азимутальной ориентации φ в наиболее напряженных точках перфорационного отверстия (а), щелевого отверстия (б), отверстия перетекания воздуха (в), перехода пера в бандажную полку (г) и елочного соединения (д) монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток

Как видно из представленных данных, независимо от используемого подхода к анализу напряженного состояния монокристаллических

лопаток, азимутальная ориентация может оказывать существенное влияние на их напряженность. Однако характер этого влияния в различных зонах концентрации напряжений отличается. Об этом свидетельствуют приведенные в табл. 1 значения разброса исследуемых характеристик напряженного состояния лопаток, определяемого как:

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} 100\%;$$

$$\Delta\tau_{\max} = \frac{(\tau_{\max})_{\max} - (\tau_{\max})_{\min}}{(\tau_{\max})_{\max}} 100\%. \quad (5)$$

Здесь же приведены значения температуры и коэффициента анизотропии длительной статической прочности для каждой из рассматриваемых наиболее напряженных зон в лопатке.

Отчетливо видно, что с повышением температуры в рассматриваемых зонах лопатки наблюдается уменьшение различия в значениях $\Delta\bar{\sigma}_{ei}$ и $\Delta\bar{\sigma}_{ea}$, а также уменьшается величина коэффициента анизотропии длительной статической прочности K_R . Это объясняется тем, что при возрастании температуры анизотропия свойств монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов, как правило, уменьшается. Поэтому при более низких температурах, например

в елочном соединении, для которого наиболее существенна анизотропия свойств монокристалла, $\Delta\bar{\sigma}_{ea}$ на порядок превышает $\Delta\bar{\sigma}_{ei}$. В то же время в зоне щелевого отверстия на выходной кромке лопатки, где $K_R \approx 3$ значения $\Delta\bar{\sigma}_{ei} = \Delta\bar{\sigma}_{ea}$. С другой стороны, величина диапазона изменения максимальных приведенных касательных напряжений в наиболее напряженных зонах монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбин существенно отличается от величины диапазона изменения эквивалентных напряжений. Видно, что величина диапазона изменения максимальных приведенных касательных напряжений в одних зонах ниже, чем величина диапазона изменения эквивалентных напряжений, а в других превышает ее. При этом, каких либо общих закономерностей не наблюдается.

Результаты выполненных вычислительных экспериментов также показывают, что для каждой из выбранных зон лопатки существует определенное расположение поперечных осей лопатки относительно главных осей монокристалла, при котором эквивалентные и максимальные приведенные касательные напряжения принимают как минимальное значение (оптимальная ориентация), так и максимальное значение (нежелательная ориентация), что видно из приведенных в табл. 2 данных.

Таблица 1

Значения температуры, коэффициента анизотропии длительной статической прочности и разброса характеристик напряженного состояния в наиболее напряженных зонах монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбин

№ п/п	Наиболее напряженная зона лопатки	T, °C	K _R	Разброс характеристик напряженного состояния %		
				Δσ _{ei}	Δσ _{ea}	Δτ _{max}
1	перфорационное отверстие на входной кромке лопатки	843	4,0	36,0	39,8	26,3
2	щелевое отверстие на выходной кромке лопатки	990	2,9	25,0	25,0	15,8
3	отверстие перетекания воздуха между охлаждающими каналами	858	3,9	8,5	8,8	19,0
4	переход пера в бандажную полку	1001	2,6	17,6	18,1	42,4
5	елочное соединение лопатки	536	6,8	1,1	11,5	9,7

Таблица 2

Значения угла, соответствующего оптимальной и нежелательной азимутальным ориентациям поперечных осей лопатки в наиболее напряженных зонах монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбин

№ п/п	Наиболее напряженная зона лопатки	Оптимальная ориентация			Нежелательная ориентация		
		φ, град			φ, град		
		σ_{ei}	σ_{ea}	τ_{max}	σ_{ei}	σ_{ea}	τ_{max}
1	перфорационное отверстие на входной кромке лопатки	-5	-5	5	40	40	30
2	щелевое отверстие на выходной кромке лопатки	-45	-45	-40	0	0	-5
3	отверстие перетекания воздуха между охлаждающими каналами	20	20	20	-20	-20	-30
4	переход пера в бандажную полку	40	40	10	-5	-5	-15
5	елочное соединение лопатки	-5	20	20	-30	-30	-45

Их анализ показывает, что как оптимальная, так и нежелательная азимутальные ориентации поперечных осей лопатки для эквивалентных напряжений σ_{ei} и σ_{ea} практически совпадают. Исключением является лишь елочное соединение в случае определения оптимальной ориентации. По всей видимости, это объясняется низким уровнем диапазона изменения эквивалентных напряжений σ_{ei} и существенной анизотропией свойств монокристалла в этой зоне (см. табл. 1).

Более сложная картина наблюдается при сравнении значений углов, соответствующих нежелательной и оптимальной ориентациям для эквивалентных напряжений и максимальных приведенных касательных напряжений. Так, в зонах перфорационных отверстий на входной кромке, щелевых на выходной кромке и отверстий перетекания воздуха между охлаждающими каналами разница в значениях рассматриваемых углов не превышает 10° . С другой стороны для елочного соединения эта разница достигает 15° для нежелательной ориентации и 30° – для оптимальной ориентации в зоне перехода пера в бандажную полку.

Заключение

С использованием наиболее широко применяемых на сегодняшний день моделей пластического деформирования и разрушения монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов и подходов для анализа напряженного состояния монокристаллических лопаток проведено расчетное исследование влияния азимутальной кристаллографической ориентации на напряженное состояние монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбин. На основании

их результатов установлено, что азимутальная кристаллографическая ориентация может оказывать существенное влияние на напряженное состояние рассматриваемых лопаток. Однако ее влияние в различных зонах лопаток существенно зависит от применяемой модели пластического деформирования и разрушения монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов и подхода для анализа напряженного состояния. Используемые подходы на основе моделей изотропного и анизотропного тел дают несколько противоречивые результаты, чем осложняют рациональный выбор азимутальной кристаллографической ориентации для монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбин. Поэтому остается открытым вопрос о выборе оптимальной азимутальной кристаллографической ориентации монокристаллических лопаток.

Литература

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: Труды ЦКТИ. – Вып. 296. – СПб., 2009. – С. 74-82.
2. Магеррамова Л.А. Выбор модели анизотропии сплава для прочностных расчетов монокристаллических рабочих лопаток турбин газотурбинного двигателя с помощью современных программных комплексов / Л.А. Магеррамова, Б.Е. Васильев // Современные методы обеспечения прочностной надежности деталей авиационных двигателей / Под ред. Ю.А. Ножницкого,

Б. Ф. Шорра, И. Н. Долгополова. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. – 456 с.

3. Гецов Л.Б. Современные нормы прочности стационарных ГТУ / Л.Б. Гецов, В.Е. Михайлов, А.С. Семенов, С.Г. Семенов // Газотурбинные технологии. – 2013. – № 8. – С. 24 – 29.

4. Придорожный Р. П. Расчетное исследование объемного напряженного состояния монокристаллической охлаждаемой лопатки турбины // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2002. – Вип. 34. – С. 119 – 123.

5. Придорожный Р. П. Сравнительный анализ напряженного состояния охлаждаемых рабочих лопаток турбины с помощью расчетных моделей различного уровня / Р. П. Придорожный, А. В. Шереметьев, А. П. Зиньковский // Вестник двигателестроения. – 2011. – № 2. – С. 183 – 187.

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. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 399 с.

8. Stouffer D. Inelastic Deformation of Metals: Models, Mechanical Properties, and Metallurgy / D. Stouffer, L. Dame. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996. – P. 387-417.

9. Шалин Р.Е. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов / Р.Е. Шалин, И.Л. Светлов, Е.Б. Качанов – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.

Поступила в редакцию 18.06.2014

Р.П. Придорожный, О.В. Шереметьев, А.П. Зиньковский. Розрахункове визначення впливу азимутальної орієнтації на напруженість монокристалічних охолоджуваних робочих лопаток турбін

У роботі за допомогою найбільш широко застосованих на сьогоднішній день моделей пластичного деформування і руйнування монокристалів жароміцних нікелевих сплавів та підходів для аналізу напруженого стану монокристалічних лопаток проведено розрахункове дослідження впливу азимутальної кристаллографічної орієнтації на напружений стан монокристалічних охолоджуваних робочих лопаток турбін. Встановлено, що азимутальна кристаллографічна орієнтація може справляти істотний вплив на напружений стан монокристалічних охолоджуваних лопаток турбін. Однак показано, що її вплив у різних зонах лопаток істотно залежить від застосовуваної моделі пластичного деформування і руйнування монокристалів жароміцних нікелевих сплавів та підходів для аналізу напруженого стану.

Ключові слова: охолоджувана робоча лопатка, монокристалічний жароміцний нікелевий сплав, азимутальна кристаллографічна орієнтація, розрахункова модель, обчислювальний експеримент, напружений стан, концентрація напружень, раціональний вибір.

R.P. Pridorozhny, A.V. Sheremetyev, A.P. Zinkovskii. Computational estimation of influence of azimuthal crystallographic orientation on strength of single-crystal cooled turbine blades

In the work with the help of most widely used for today models of plastic deformation and damage of single-crystal nickel-base superalloys and approaches for the analysis of stress state of single-crystal blades computational research of influence of azimuth crystallographic orientation on stress state of single-crystal cooled turbine blades are carried out. The essential effect of azimuth crystallographic orientation on stress state of single-crystal cooled turbine blades has been established. However it is shown, that its effect in various zones of blades essentially depends on applied model of a plastic deformation and damage of single-crystal nickel-base superalloys and the approach for the analysis of stress state.

Key words: cooled blade, single-crystal nickel-base superalloy, azimuth crystallographic orientation, computational model, computing experiment, stress state, stress concentration, rational choice.