

## О рациональном выборе азимутальной кристаллографической ориентации монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбин АГТД

Р. П. Придорожный<sup>а</sup>, А. В. Шереметьев<sup>а</sup>, А. П. Зиньковский<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Государственное предприятие “Запорожское машиностроительное конструкторское бюро “Прогресс” им. А. Г. Ивченко”, Запорожье, Украина

<sup>б</sup> Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*Исследовано влияние азимутальной кристаллографической ориентации на прочность монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбин. Показано влияние особенностей систем охлаждения на рациональный выбор азимутальной кристаллографической ориентации современных монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбин. Совершенствование конструкции рассматриваемых охлаждаемых рабочих лопаток и систем охлаждения позволяет снизить влияние азимутальной кристаллографической ориентации на их напряженное состояние.*

**Ключевые слова:** монокристаллическая рабочая лопатка турбины, система охлаждения, азимутальная кристаллографическая ориентация, напряженно-деформированное состояние, ресурс.

**Введение.** Анализ развития современного авиационного двигателестроения показывает, что использование монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов [1] в практике производства рабочих лопаток турбин с эффективными системами охлаждения позволяет повысить температуру газа перед турбиной до 1250 К, характерную для двигателей третьего поколения, и до 1850 К в перспективных двигателях пятого поколения [2]. Следует отметить, что создание монокристаллических рабочих лопаток с развитой системой охлаждения и высокими эксплуатационными характеристиками стало возможным благодаря разработке технологии вакуумной выплавки таких сплавов и литья лопаток методом высокоградиентной направленной кристаллизации.

Характерной особенностью монокристаллических охлаждаемых лопаток из современных жаропрочных никелевых сплавов, обладающих существенной анизотропией физических и механических свойств [1], является высокий уровень температурных напряжений, которые в два-три раза превышают таковые от действия центробежных и газовых нагрузок. Их снижение возможно не только вследствие изменения конструкции и совершенствования системы охлаждения монокристаллической лопатки, но и выбора определенной ее кристаллографической ориентации.

Обеспечение необходимой прочности монокристаллических охлаждаемых лопаток обычно достигается путем формирования их оптимальной структуры в аксиальной (в направлении продольной оси) кристаллографической ориентации  $\langle 001 \rangle$  при минимальном модуле упругости. При этом недооценивается влияние азимутальной ориентации (в направлении поперечных осей). Однако вследствие анизотропии свойств монокристалла при заданной аксиальной ориентации  $\langle 001 \rangle$  возможное изменение азимутальной ориентации вдоль границы  $\langle 001 \rangle - \langle 011 \rangle$  приводит к возрастанию в 1,7 раза модуля упругости в поперечном направлении, которому пропорциональны температурные напряжения [1]. Значительное влияние азимутальной ориентации на напряженность охлаждаемых монокристаллических лопаток также подтверждается результатами расчетных исследований [3].

С учетом вышеизложенного на стадии проектирования монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток для повышения их надежности и долговечности необходимо решить задачу рационального выбора азимутальной кристаллографической ориентации. Особенно это актуально для лопаток с конвективно-пленочной системой охлаждения, которые получили широкое применение в турбинах современных авиационных газотурбинных двигателей (АГТД). Такие лопатки характеризуются развитой системой разветвляющихся охлаждающих каналов, отверстий перетекания между каналами, ребер для интенсификации охлаждения, перфорационных и щелевых отверстий. Решение данной задачи возможно только на основании знания влияния азимутальной кристаллографической ориентации на напряженно-деформированное состояние (НДС) рассматриваемых лопаток.

Таким образом, целью настоящей работы является расчетное установление закономерностей влияния азимутальной кристаллографической ориентации на характеристики напряженного состояния монокристаллических охлаждаемых лопаток.

**Объекты исследования и их моделирование.** Объектом исследования служили монокристаллические охлаждаемые рабочие лопатки с конвективно-пленочной системой охлаждения, которые используются в турбинах высокого давления таких АГТД: турбовинтовые (ТВГТД); турбореактивные двухконтурные (ТРДД); турбовинтовентиляторные (ТВВД), отличающихся мощностью  $N$  и тягой  $R$ . В табл. 1 приведены выбранные современные и перспективные АГТД и некоторые характеристики рабочих лопаток турбин высокого давления. На рис. 1 показано среднее поперечное сечение рабочей лопатки одного из рассматриваемых двигателей.

Для исследуемых охлаждаемых лопаток, разработанных для двигателей различной тяги и мощности, характерна различная температура газа на входе в турбину. Это обуславливает их конструктивные различия (рис. 1), температурное и напряженное состояние.

Т а б л и ц а 1

**Тип двигателя и некоторые характеристики монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток**

№ и тип двигателя	Количество охлаждающих каналов	Температура газа перед турбиной, °С	Перепад температур по сечению, °С	Доля температурных напряжений, %	$\Delta(K_m)_{\min}$ , %
I, ТВГТД, $N = 2800$ л.с	3	1023	106	28	2
II, ТРДД, $R = 2500$ кгс	4	1267	248	43	19
III, ТРДД, $R = 23430$ кгс	5	1357	271	65	61
IV, ТВВД, $N = 14545$ л.с	6	1437	326	69	65
V, Перспективный ТРДД	7	1472	264	62	33
VI, Перспективный ТВВД	8	1477	290	64	46
		1527	305	65	40

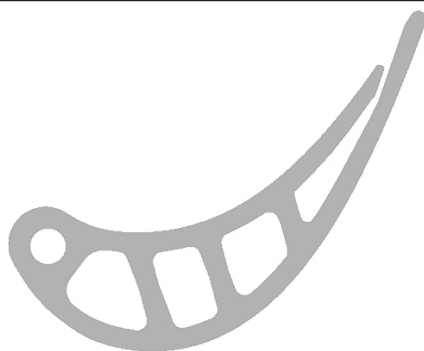


Рис. 1. Среднее поперечное сечение охлаждаемой монокристаллической рабочей лопатки турбины высокого давления одного из рассматриваемых двигателей.

Как видно из данных табл. 1, чтобы повысить температуру газа перед турбиной, необходимо увеличить количество охлаждающих каналов в лопатке, что усложняет ее конструкцию. Это обуславливает возрастание перепада температур по сечению пера лопаток и доли температурных напряжений в общем уровне их напряженности. Однако создание охлаждаемых лопаток для перспективного ТРДД (двигатель № V) позволило, несмотря на увеличение количества охлаждающих каналов, несколько уменьшить перепад температур по сечению и, как следствие, долю температурных напряжений. В то же время на примере охлаждаемой лопатки перспективного ТВВД (двигатель № VI) видно, что повышение температуры газа перед турбиной приводит к возрастанию перепада температур по сечению и, следовательно, к некоторому увеличению доли температурных напряжений.

Для расчета характеристик НДС исследуемых рабочих лопаток использовались как полупространственные, так и трехмерные расчетные модели.

**Результаты исследований.** Для установления закономерностей влияния азимутальной кристаллографической ориентации на напряженность и ресурс выбранных рабочих лопаток с учетом их конструктивных особенностей и условий эксплуатации был проведен комплекс вычислительных экспериментов.

Все расчеты проводились на установившемся (стационарном) максимальном взлетном режиме двигателя в упругопластической постановке без учета процессов ползучести материала.

Предварительно были выполнены расчеты теплового состояния исследуемых рабочих лопаток на выбранном режиме работы двигателя на основе использования апробированных на практике подходов к проведению в 3D постановке расчетов теплового состояния, которые были применены в [4] с поправкой на экспериментальные результаты, полученные при термометрировании лопаток на работающем двигателе. Это дало возможность учитывать при определении характеристик НДС лопаток зависимость свойств их материала от температуры и осуществить моделирование теплового контакта между рабочими лопатками и диском. Основываясь на механизмах деформирования и разрушения монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов, в качестве критерия напряженности объектов исследования использовался коэффициент запаса длительной статической прочности  $K_m$  (далее – коэффициент запаса) с учетом анизотропии их физических и механических свойств [5], который в соответствии с требованиями нормативных документов для монокристаллических лопаток АГТД при стационарном нагружении определяется по формуле

$$K_m = \frac{\sigma_{R<001>}}{\sigma_{eq}}. \quad (1)$$

Здесь  $\sigma_{R<001>}$  – предел длительной статической прочности монокристаллического сплава при растяжении в направлении  $\langle 001 \rangle$ ;  $\sigma_{eq}$  – эквивалентное напряжение, зависящее от коэффициента анизотропии длительной статической прочности [6],

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

где  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений в системе координат, связанных с главными кристаллографическими направлениями  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 010 \rangle$  и  $\langle 001 \rangle$  монокристалла;  $K_R$  – коэффициент анизотропии длительной статической прочности, вычисляемый по формуле

$$K_R = 4 \left( \frac{\sigma_{R<001>}}{\sigma_{R<011>}} \right)^2 - 1. \quad (3)$$

В данном случае  $\sigma_{R<011>}$  – предел длительной статической прочности монокристаллического сплава при растяжении в направлении  $\langle 011 \rangle$  [7].

Расчеты проводились в такой последовательности:

1) фиксация одного из главных (в данном случае  $\langle 001 \rangle$ ) направлений монокристалла вдоль продольной оси лопатки;

2) вариация положением двух других главных осей монокристалла относительно осей лопатки в плоскости поперечного сечения (рис. 2), определяемого углом азимутальной ориентации  $\varphi$ , изменяемым в диапазоне  $0 \dots 360^\circ$ ;

3) расчет характеристик НДС для каждого заданного положения главных осей монокристалла.

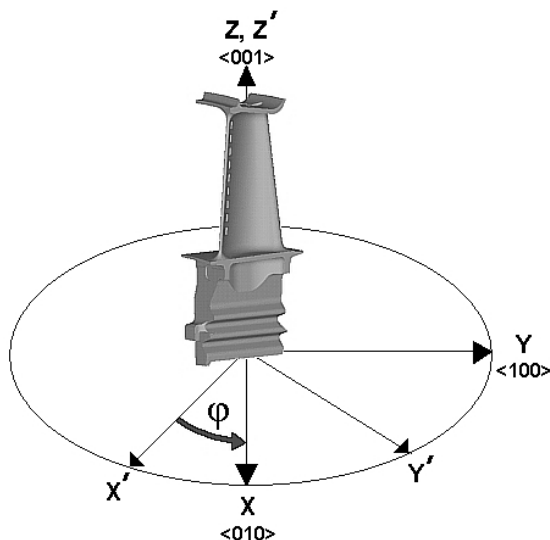


Рис. 2. Системы декартовых координат, описывающих положение главных осей монокристалла ( $XYZ$ ) относительно осей лопатки ( $X'Y'Z'$ ).

Поскольку, как отмечалось выше, напряженность монокристаллических охлаждаемых лопаток в большей степени определяется распределением и уровнем температурных напряжений, все расчеты выполнены для средних поперечных сечений выбранных лопаток как наиболее термонапряженных.

По результатам проведенных расчетных исследований с использованием разработанных моделей рассматриваемых монокристаллических охлаждаемых рабочих

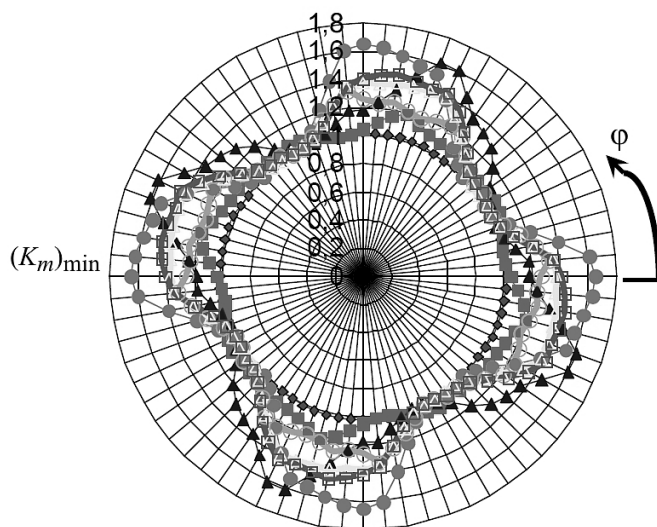


Рис. 3. Окружные распределения минимальных значений коэффициента запаса  $K_m$  в зависимости от угла азимутальной ориентации  $\varphi$  охлаждаемых монокристаллических рабочих лопаток турбины высокого давления двигателей № I (◆), II (■), III (▲), IV (●), V (○) и VI (□, △).

лопаток при зафиксированной аксиальной ориентации их продольной оси в направлении  $\langle 001 \rangle$  были определены окружные распределения минимальных значений  $(K_m)_{\min}$  коэффициента запаса  $K_m$  от угла азимутальной ориентации  $\varphi$ , которые представлены на рис. 3.

В качестве характеристики полученных распределений был выбран параметр

$$\Delta(K_m)_{\min} = \frac{(K_m)_{\min}^{\max} - (K_m)_{\min}^{\min}}{(K_m)_{\min}^{\min}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

значения которого для исследуемых лопаток приведены в табл. 1.

Из представленных выше данных следует, что азимутальная ориентация продольных осей рассматриваемых лопаток может оказывать существенное влияние на их работоспособность и долговечность. Кроме того, существует такое расположение продольных осей лопатки относительно главных осей монокристалла, при котором минимальный коэффициент запаса принимает максимальное значение, что позволяет еще на стадии проектирования монокристаллической охлаждаемой рабочей лопатки осуществить рациональный выбор азимутальной кристаллографической ориентации.

Анализ полученных результатов исследований монокристаллических охлаждаемых лопаток с конвективно-пленочной системой охлаждения показывает, что с увеличением перепада температур по сечению и доли температурных напряжений повышается влияние азимутальной кристаллографической ориентации на их надежность и ресурс. С другой стороны, совершенствование системы охлаждения и значительное увеличение количества охлаждающих каналов в рабочих лопатках турбин перспективных АГТД приводят к уменьшению доли температурных напряжений и, как следствие, влияния азимутальной кристаллографической ориентации. При этом, как показано на примере рабочей лопатки перспективного ТВВД (двигатель № VI), к уменьшению влияния азимутальной ориентации также может привести повышение температуры газа перед турбиной. Это обусловлено тем, что с увеличением уровня температур в лопатках уменьшается анизотропия свойств монокристалла при одновременном существенном сокращении их ресурса.

В целом можно заключить, что основными факторами являются снижение влияния азимутальной кристаллографической ориентации на напряженность монокристаллических охлаждаемых лопаток, а также совершенствование их системы охлаждения с целью повышения надежности и продления ресурса рабочих колес.

Как отмечалось выше, современные лопатки вследствие наличия развитой системы охлаждения имеют сложную геометрическую форму. Поэтому в некоторых зонах лопатки наблюдается не только значительная неравномерность распределения температур, но и высокий уровень концентрации напряжений. Такие зоны являются, как правило, наиболее опасными с точки зрения прочности лопатки [8]. С учетом этого обстоятельства решение задачи о рациональном выборе азимутальной кристаллографической ориентации невозможно без всестороннего анализа температурного и напряженного состояния в указанных зонах монокристаллических охлаждаемых лопаток.

С использованием трехмерных моделей рассматриваемых монокристаллических охлаждаемых лопаток были проведены расчетные исследования НДС в наиболее характерных зонах концентрации напряжений: перфорационные отверстия на входной кромке; щелевые отверстия на выходной кромке; переход пера в бандажную полку; елочное замковое соединение; отверстия перетекания воздуха между охлаждающими каналами (рис. 4). В табл. 2 представлены некоторые характеристики зон концентрации напряжений, в которых наблюдается высокий уровень температурных напряжений.

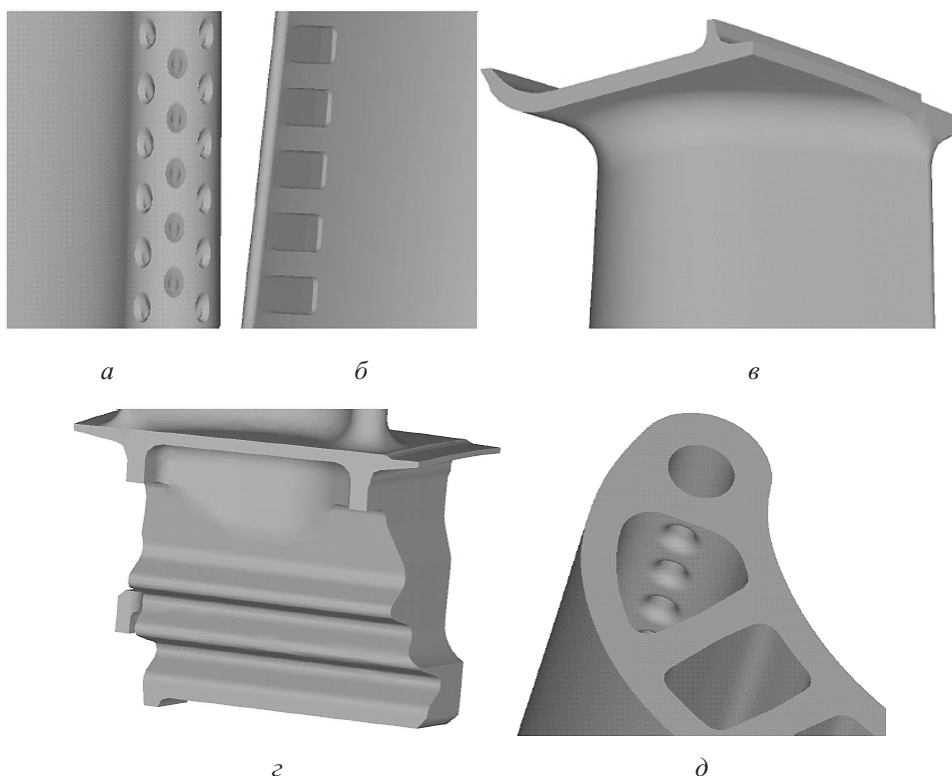


Рис. 4. Характерные зоны концентрации напряжений монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбины высокого давления: *a* – перфорационные отверстия на входной кромке; *б* – щелевые отверстия на выходной кромке; *в* – переход пера в бандажную полку; *г* – елочное замковое соединение; *д* – отверстия перетекания воздуха между охлаждающими каналами.



Т а б л и ц а 2

**Характеристики рассматриваемых зон концентрации напряжений  
монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток**

Зона концентрации напряжений	Доля температурных напряжений, %	Градиент температур, °С/мм	$\Delta(K_m)_{\min}$ , %
Перфорационное отверстие на входной кромке лопатки	89	179	44
Щелевое отверстие на выходной кромке лопатки	40	43	26
Переход пера в бандажную полку	17	24	19
Елочное замковое соединение	18	13	12
Отверстие перетекания воздуха между охлаждающими каналами	62	10	9

Полученные на основании результатов проведенных расчетов окружные распределения минимального коэффициента запаса в зависимости от угла азимутальной ориентации в наиболее напряженных точках выбранных зон концентрации напряжений исследуемых лопаток приведены на рис. 5. Как видно, влияние угла азимутальной ориентации на долговечность лопаток в различных зонах концентрации напряжений существенно различается. При этом для каждой из их наиболее напряженных точек существует определенное расположение продольных осей лопатки относительно главных осей монокристалла, при котором минимальный коэффициент запаса в конкретной точке принимает максимальное значение, что увеличивает объем работ по выбору рациональной азимутальной кристаллографической ориентации.

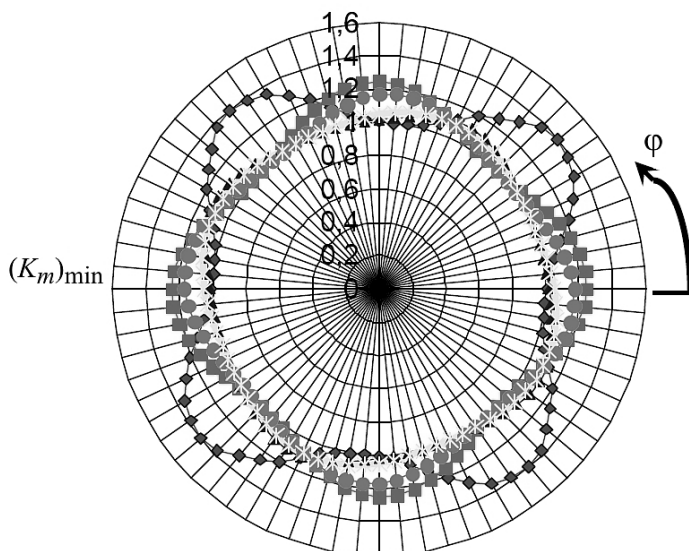


Рис. 5. Окружные распределения минимальных значений коэффициента запаса  $K_m$  в зависимости от угла азимутальной ориентации  $\varphi$  охлаждаемых монокристаллических рабочих лопаток в наиболее напряженной точке перфорационного отверстия (◆), щелевого отверстия (■), елочного соединения (▲), перехода пера в бандажную полку (●), отверстия перетекания воздуха (×).

В табл. 2 для рассматриваемых зон концентрации напряжений монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток приведены значения параметра  $\Delta(K_m)_{\min}$ . Видно, что имеет место существенное изменение минимальных значений коэффициента запаса в зависимости от азимутальной ориентации. Однако однозначной их зависимости от уровня температурных напряжений вблизи рассматриваемых зон не обнаружено. Так, в наиболее напряженной точке перфорационного отверстия, в которой доля температурных напряжений составляет 89%,  $\Delta(K_m)_{\min} = 44\%$ . В то же время в наиболее напряженной точке отверстия перетекания воздуха между охлаждающими каналами, для которой также характерен относительно высокий уровень температурных напряжений, значение указанного параметра равно лишь 9%. При этом, как видно из приведенных в табл. 2 данных, четко прослеживается зависимость параметра  $\Delta(K_m)_{\min}$  от градиента температур в зонах концентрации напряжений.

Таким образом, усложнение конструкции монокристаллических охлаждаемых лопаток с целью интенсификации их охлаждения приводит к неизбежному увеличению концентрации напряжений, в зонах которых, как следует из результатов исследований, наблюдается достаточно существенное влияние азимутальной кристаллографической ориентации на характеристики НДС. Поэтому очень важно уже на стадиях проектирования и доводки конструкции монокристаллических охлаждаемых лопаток осуществить рациональный выбор азимутальной кристаллографической ориентации с точки зрения обеспечения требуемого их ресурса и надежности путем совершенствования системы охлаждения, повышения эффективности ее работы, уменьшения уровня температурных напряжений и перепада температур в местах концентрации напряжений.

## Выводы

1. Установлено существование оптимального азимутального расположения главных осей монокристалла по отношению к осям лопатки в плоскости ее поперечного сечения, которое характеризуется снижением ее максимальной статической напряженности.

2. В зонах повышенной неравномерности температур и концентрации напряжений из-за развитой системы охлаждающих каналов, щелевых и перфорационных отверстий достоверный выбор азимутальной ориентации возможен только на основе анализа сложного напряженного состояния монокристаллических охлаждаемых лопаток с учетом механизмов деформирования и разрушения монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов.

3. Показано, что влияние азимутальной ориентации главных осей монокристалла на характеристики статического НДС лопаток возрастает с увеличением перепада температур по их поперечному сечению. Как установлено, его можно снизить за счет совершенствования системы охлаждения.

Таким образом, использование результатов вычислительных экспериментов на стадии проектирования лопаток позволяет установить наиболее рациональную азимутальную ориентацию, обеспечивающую их требуемый ресурс.

## Резюме

Досліджено вплив азимутальної кристаллографічної орієнтації на міцність монокристалічних охолоджуваних робочих лопаток турбін. Показано вплив особливостей систем охолодження на раціональний вибір азимутальної кристаллографічної орієнтації сучасних монокристалічних охолоджуваних робочих лопаток турбін. Удосконалення конструкції досліджуваних охолоджуваних робочих лопаток і систем охолодження дозволяє знизити вплив азимутальної кристаллографічної орієнтації на їх напружений стан.



1. Шалин Р. Е., Светлов И. Л., Качанов Е. Б. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
2. Каблов Е., Кишкин С. Перспективы применения литейных жаропрочных сплавов для производства турбинных лопаток ГТД // Газотурбинные технологии. – 2002. – № 1. – С. 34–37.
3. Придорожный Р. П. Расчетное исследование объемного напряженного состояния монокристаллической охлаждаемой лопатки турбины // Авиац.-косм. техника и технология. – 2002. – Вып. 34. – С. 119–123.
4. Локай В. П., Бодунов М. Н., Жуйков В. В., Щукин А. В. Теплопередача в охлаждаемых деталях газотурбинных двигателей летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1985. – 213 с.
5. Гецов Л. Б., Михайлов В. Е., Семенов А. С., Семенов С. Г. Современные нормы прочности стационарных ГТУ // Газотурбинные технологии. – 2013. – № 1. – С. 24–29.
6. Гецов Л. Б., Семенов А. С., Рыбников А. И., Тихомирова Е. А. Критерии разрушения монокристаллических сплавов при статическом и термоциклическом нагружении // Вестн. двигателестроения. – 2012. – № 2. – С. 255–263.
7. Голубовский Е. Р., Светлов И. Л., Хвацкий К. К. Закономерности изменения аксиальной и азимутальной анизотропии прочностных характеристик монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов для лопаток ГТД // Авиац.-косм. техника и технология. – 2005. – № 10 (26). – С. 50–54.
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.

Поступила 14. 05. 2014