

УДК 629.7.036:539.4

Канд. техн. наук Р. П. Придорожный¹, канд. техн. наук А. В. Шереметев¹,
д-р техн. наук А. П. Зиньковский²

¹ Государственное предприятие «Ивченко-Прогресс», г. Запорожье

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

ОСОБЕННОСТИ АЗИМУТАЛЬНОЙ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ ОХЛАЖДАЕМЫХ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН

Исследовано влияние азимутальной кристаллографической ориентации на прочность монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток с учетом особенностей их системы охлаждения. Установлено, что совершенствование системы охлаждения и рациональный выбор азимутальной кристаллографической ориентации монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбин, обеспечивает повышение их надежности и ресурса.

Ключевые слова: азимутальная кристаллографическая ориентация, монокристаллические лопатки, система охлаждения, надежность, долговечность.

Введение и постановка задачи

В связи с широким использованием для авиационных ГТД рабочих лопаток турбин из монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов, составной частью проблемы прочности таких лопаток стал вопрос о влиянии кристаллографической ориентации монокристалла на их надежность и долговечность. Это обусловлено тем, что монокристаллы обладают существенной анизотропией как физических, так и механических свойств.

Неизбежным следствием охлаждения лопаток является неравномерное распределение температуры и высокий уровень температурных напряжений, который в 2–3 раза может превышать уровень напряжений, возникающих от действия центробежных и газовых нагрузок. Поэтому в процессе проектирования охлаждаемой лопатки очень важно снизить уровень действующих температурных напряжений. Это возможно не только за счет повышения эффективности охлаждения, но и путем выбора определенной ориентации монокристалла.

В ходе расчетных исследований [1–4] было сформировано одно из основных требований к отливке монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбин – совпадение их продольной оси с кристаллографическим направлением $\langle 001 \rangle$ монокристалла, когда относительно высокие прочностные характеристики будут обеспечены при пониженном модуле упругости, поскольку температурные напряжения пропорциональны его величине. При этом в большинстве случаев азимутальная ориентация осей монокристалла в плоскости поперечного сечения лопатки обычно не регламентируется. Однако, как пока-

зывают результаты исследований, надежность и долговечность монокристаллических лопаток может в значительной мере зависеть от выбора азимутальной ориентации. Поэтому на стадии проектирования монокристаллической охлаждаемой рабочей лопатки турбины очень важно при фиксированной аксиальной ориентации лопатки выявить наиболее оптимальную, с точки зрения прочности, азимутальную ориентацию.

С развитием технологии литья монокристаллических лопаток и необходимостью повышения температуры газа перед турбиной, их конструкция также претерпевала определенные изменения. В частности происходили существенные изменения в системе охлаждения лопаток. Поэтому целью данной работы является изучение влияния азимутальной кристаллографической ориентации на прочность монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток с учетом особенностей их системы охлаждения.

1 Объект исследования и его расчетная модель

В качестве объектов исследования были выбраны монокристаллические охлаждаемые рабочие лопатки ТВД, разработанные на ГП «Ивченко-Прогресс» для эксплуатации на различных двигателях.

Современная охлаждаемая рабочая лопатка – это лопатка с особо сложной конструкцией, большим количеством внутренних каналов и развитой системой интенсификаторов охлаждения, отверстий перетекания, щелей и перфорации. Поэтому для достоверной и точной оценки ее НДС, как правило, требуется построение трехмерной расчетной модели. Однако, как показывает опыт проектирования, для исследования влияния ази-

мутальной ориентации на прочность монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток, вполне достаточно рассмотреть наиболее термонапряженное среднее поперечное сечение такой лопатки, поскольку влияние кристаллографической ориентации кристалла на прочность монокристаллической охлаждаемой лопатки в большей степени определяется распределением и уровнем термических напряжений в этом сечении.

Таким образом, для исследования влияния азимутальной ориентации на прочность монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток были выбраны, охлаждаемые рабочие лопатки малоразмерного ГТД, ТРДД с тягой $R = 2500$ кгс и $R = 23430$ кгс, современного и перспективного ТВВД, средние сечения которых представлены на рис. 1.

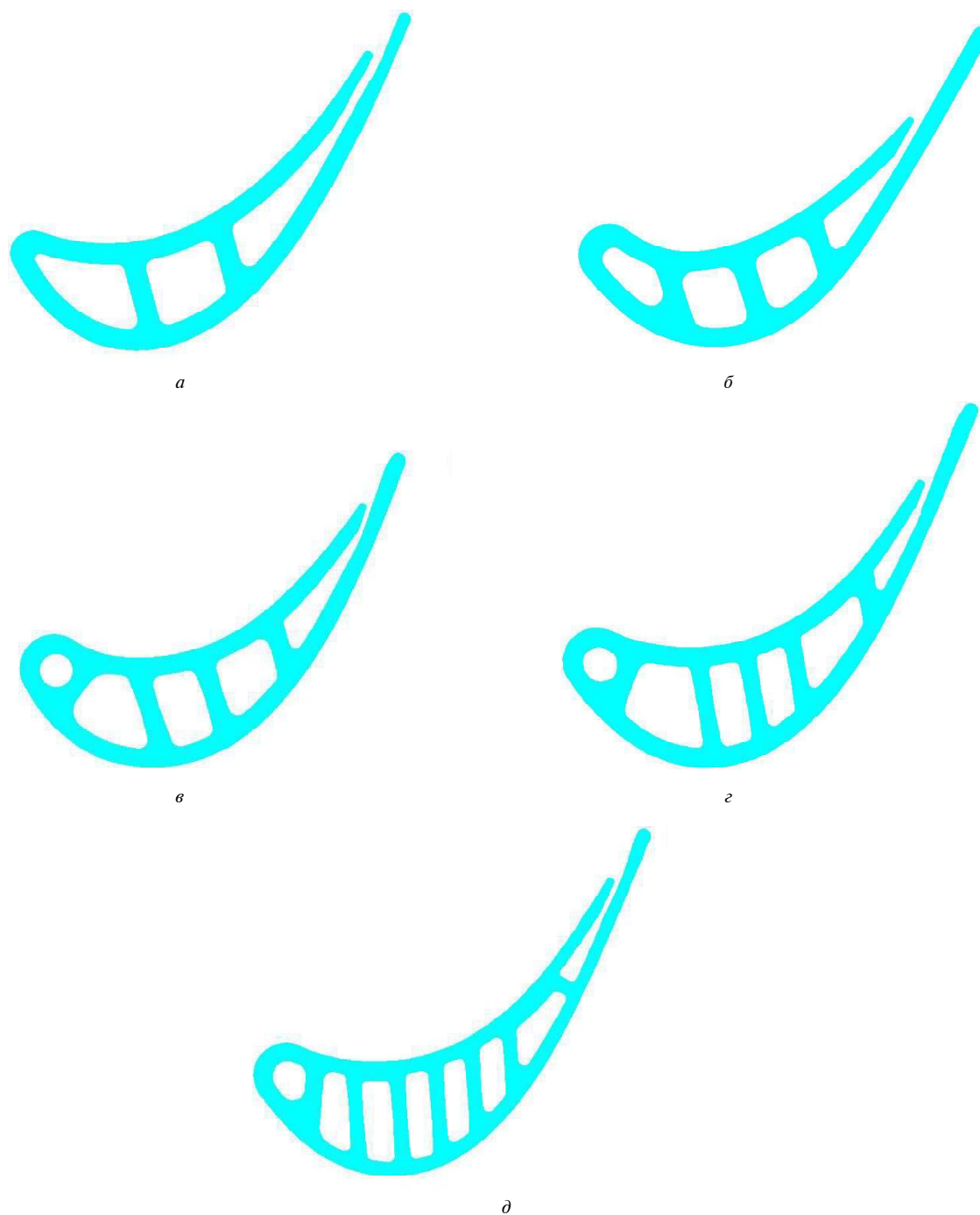


Рис. 1. Расчетные сечения охлаждаемых рабочих лопаток турбины высокого давления малоразмерного ГТД (а), ТРДД с тягой $R = 2500$ кгс (б) и $R = 23430$ кгс (в), современного (г) и перспективного (д) ТВВД

2 Результаты расчетов

Следует отметить, что рассматриваемые в данной работе охлаждаемые рабочие лопатки разработаны для двигателей с различной температурой газа перед турбиной, что обуславливает их конструктивные отличия, и как показано в таблице 1, температурное и напряженное состояния.

Как видно из представленных данных, при повышении температуры газа перед турбиной увеличивается число охлаждающих каналов в системе охлаждения лопатки, одновременно, за исключением перспективного двигателя, увеличивается перепад температур по сечению и возрастает доля термических напряжений в общем уровне напряженности лопатки. Однако при создании лопатки для перспективного двигателя наметилась тенденция, что дальнейшее увеличение числа охлаждающих каналов может привести к уменьшению перепада температур по сечению и уменьшению доли термических напряжений в лопатке.

В настоящей работе, для установления закономерностей влияния азимутальной ориентации

на долговечность и надежность исследуемых монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток, была использована полупространственная модель лопатки, а в качестве критерия оценки - коэффициент запаса статической прочности. Здесь следует отметить, что эта модель применима к монокристаллическим лопаткам только тогда, когда продольная ось лопатки совпадает с кристаллографическим направлением $\langle 001 \rangle$. Однако, как было указано выше, этот случай и является наиболее важным для современных монокристаллических лопаток с большими температурными перепадами по сечению.

Все расчеты НДС исследуемых лопаток проводились в упругопластической постановке без учета процессов ползучести материала.

Таким образом, изменяя положение главных осей монокристалла x, y относительно осей лопатки x', y' в плоскости поперечного сечения на угол φ (см. рис. 2), можно определить влияние азимутальной ориентации на напряженное состояние лопатки.

Влияние азимутальной ориентации удобно охарактеризовать плоскими замкнутыми кривы-

Таблица 1 - Анализ температурного и напряженного состояний охлаждаемых рабочих лопаток турбин

№ п/п	Двигатель	Температура газа перед турбиной, °С	Количество охлаждающих каналов	Перепад температур по сечению, °С	Доля Термических напряжений, %
1	Малоразмерный ГТД	1147	3	105	31
2	ТРДД с тягой $R = 2500$ кгс	1267	4	248	43
3	ТРДД с тягой $R = 23430$ кгс	1357	5	271	65
4	Современный ТВВД	1437	6	326	69
5	Перспективный ТВВД	1527	8	305	65

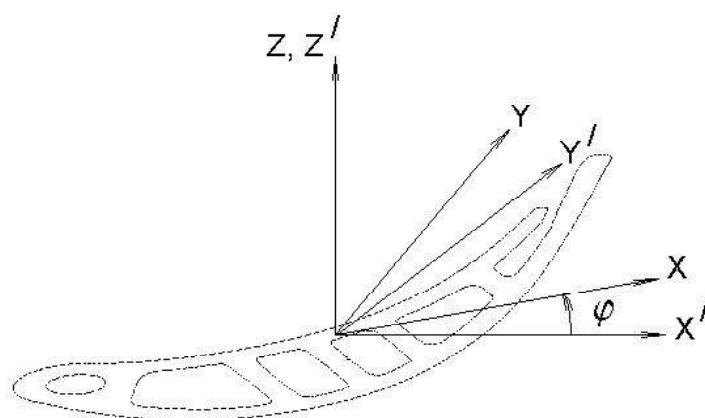


Рис. 2. Системы декартовых координат, описывающих главные оси монокристалла (x, y, z) и положение поперечного сечения лопатки (x', y', z')

ми, если зафиксировать одно из направлений в кристалле (в данном случае $\langle 001 \rangle$), а два других вращать вокруг первого, не изменяя положения самого кристалла в пространстве. Каждая точка замкнутой кривой определяет минимальное значение коэффициентов запаса при различной азимутальной ориентации для выбранного отклонения продольной оси лопатки от кристаллографического направления $\langle 001 \rangle$. Для исследуемых монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток на рис. 3 в таком виде приведены относительные распределения минимальных коэффициентов запаса (K_m) в зависимости от азиму-

тальной ориентации лопатки (φ) при отсутствии отклонения ее продольной оси.

Из представленных зависимостей следует, что для исследуемых монокристаллических охлаждаемых лопаток, отливаемых в направлении кристаллизации $\langle 001 \rangle$, азимутальное расположение осей монокристалла по отношению к осям лопатки в плоскости ее поперечного сечения, может оказывать существенное влияние на их надежность и долговечность. Диапазон изменения минимальных коэффициентов запаса в зависимости от азимутальной ориентации рассматриваемых лопаток представлен в таблице 2.

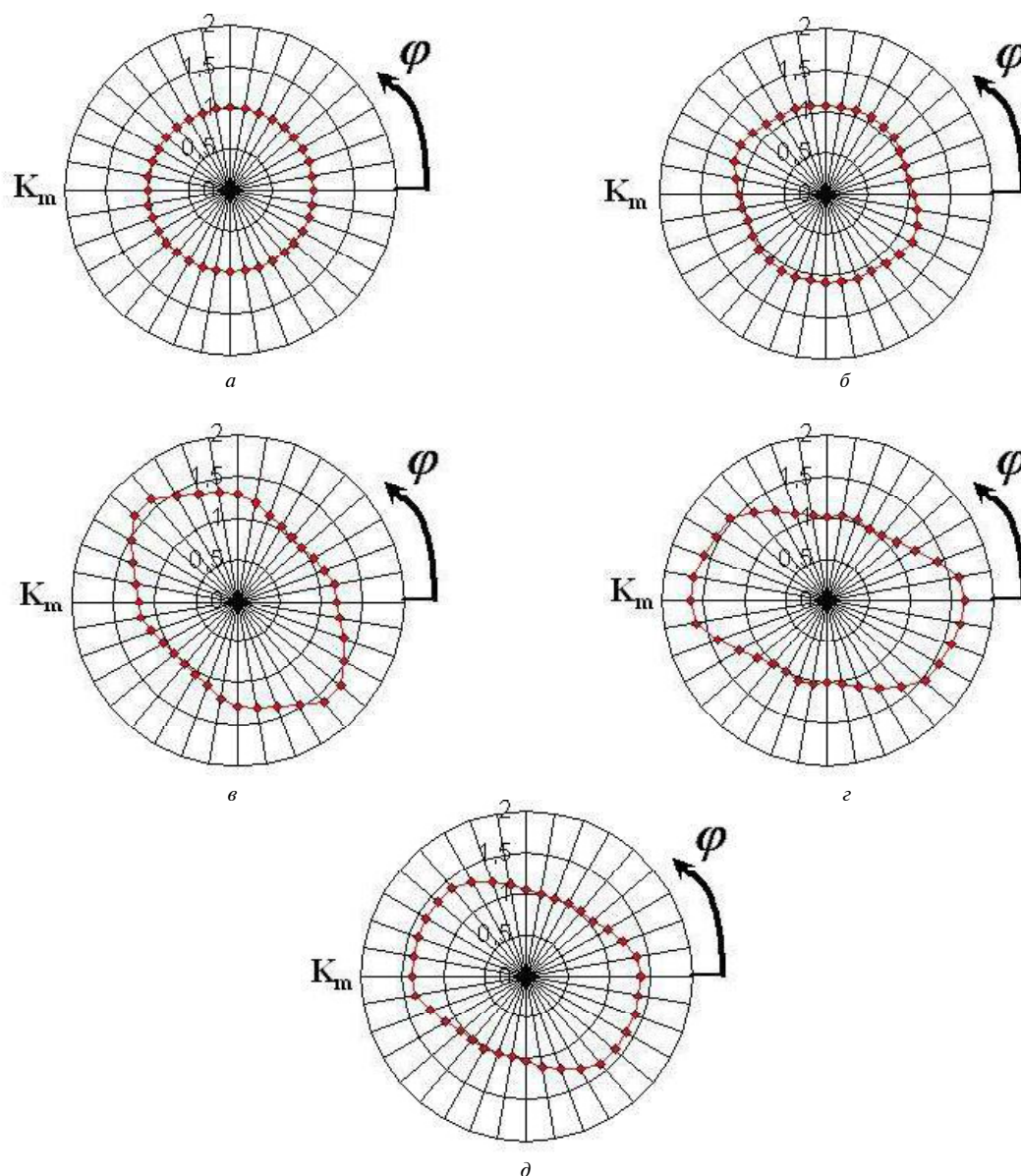


Рис. 3. Относительные распределения минимальных коэффициентов запаса (K_m) в зависимости от азимутальной ориентации (φ) монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбины высокого давления малоразмерного ГТД (а), ТРДД с тягой $R = 2500$ кгс (б) и $R = 23430$ кгс (в), современного (г) и перспективного (д) ТВВД

Таблица 2 – Анализ влияния азимутальной ориентации на минимальные коэффициенты запаса в охлаждаемых рабочих лопатках турбин

№ п/п	Двигатель	Диапазон изменения K_m , %
1	Малоразмерный ГТД	1
2	ТРДД с тягой $R = 2500$ кгс	19
3	ТРДД с тягой $R=23430$ кгс	61
4	Современный ТВВД	65
5	Перспективный ТВВД	40

Как видно из представленных данных, с увеличением перепада температур по сечению и возрастом доли термических напряжений все большее влияние на прочность монокристаллической охлаждаемой лопатки оказывает ее азимутальная ориентация. Однако при создании перспективного двигателя наметилась тенденция, что дальнейшее увеличение числа охлаждающих каналов может привести к уменьшению доли термических напряжений, тем самым, уменьшив влияния азимутальной ориентации на надежность и долговечность монокристаллической охлаждаемой рабочей лопатки турбины, что облегчает формирование рабочих колес из лопаток с различной азимутальной ориентацией. Тем не менее, влияние азимутальной ориентации все еще остается на достаточно высоком уровне и поэтому на стадии проектирования желательно сделать обоснованный выбор рациональной кристаллографической ориентации, обеспечивающей повышение надежности и ресурса монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбин.

Заключение

На основании проведенного анализа результатов исследований по изучению влияния азимутальной кристаллографической ориентации на прочность монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток с учетом особенностей их системы охлаждения

Придорожний Р.П., Шеремет'єв О.В., Зінковський А.П. Особливості азимутальної кристаллографічної орієнтації охолоджуваних робочих лопаток турбін

Досліджено вплив азимутальної кристаллографічної орієнтації на міцність монокристалічних охолоджуваних робочих лопаток турбін з урахуванням особливостей їх системи охолодження. Встановлено, що удосконалення системи охолодження та раціональний вибір азимутальної кристаллографічної орієнтації монокристалічних охолоджуваних робочих лопаток турбін забезпечує підвищення їх надійності і ресурсу.

Ключові слова: азимутальна кристаллографічна орієнтація, монокристалічні лопатки, система охолодження, надійність, довговічність.

Pridorozhnyi R., Sheremetyev A., Zin'kovskiy A. Features azimuthal crystallographic orientation of the rotor blades cooled turbine

The influence of azimuthal crystallographic orientation on strength of monocrystalline cooled turbine blades taking into account features of their system of cooling is investigated. The improvement of system of cooling and the efficient choice of azimuthal crystallographic orientation of monocrystalline cooled turbine blades, that provided increase of their reliability and service life, is established.

Key words: azimuthal crystallographic orientation, monocrystalline blades, cooling system, reliability, durability.

можно сформулировать следующие выводы:

1. Рациональный выбор азимутальной кристаллографической ориентации монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбин, обеспечивает повышение их надежности и ресурса.

2. Совершенствование системы охлаждения монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбин позволяет уменьшить влияние азимутальной кристаллографической ориентации на их надежность и долговечность.

Перечень ссылок

1. Колесников В. И. К ресурсному проектированию монокристаллических охлаждаемых лопаток турбины / В. И. Колесников, Р. П. Придорожний // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования», Харьков, 29 сент. – 2 окт., 1997. – Харьков : ИПМ НАН Украины, 1997. – С. 522–526.
2. Придорожний Р. П. Расчетное исследование объемного напряженного состояния монокристаллической охлаждаемой лопатки турбины / Р. П. Придорожний // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2002. – Вып. 34. – С. 119–123.
3. Придорожний Р. П. Особенности влияния кристаллографической ориентации на усталостную прочность монокристаллических рабочих лопаток турбин / Р. П. Придорожний, А. В. Шереметьев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – Вып. 10/26. – С. 55–59.
4. Придорожний Р. П. Влияние кристаллографической ориентации на спектр собственных колебаний и предел выносливости монокристаллических рабочих лопаток турбин / Р. П. Придорожний, А. В. Шереметьев, А. П. Зиньковский // Пробл. прочности. – 2008. – № 5. – С. 15–27.

Поступила в редакцию 06.09.2010