

УДК 629.7.036:539.4

Канд. техн. наук Р. П. Придорожный¹, канд. техн. наук А. В. Шереметьев¹,
д-р техн. наук А. П. Зиньковский²

¹ГП «Ивченко-Прогресс», г. Запорожье

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

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АЗИМУТАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ НА НАПРЯЖЕННОСТЬ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ОХЛАЖДАЕМОЙ ЛОПАТКИ В СИСТЕМЕ ПЕРФОРАЦИОННЫХ ОТВЕРСТИЙ

В статье исследовано влияние азимутальной кристаллографической ориентации на прочность монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток с учетом особенностей их системы перфорационных отверстий. Установлено, что улучшение эффективности системы охлаждения и рациональный выбор азимутальной кристаллографической ориентации монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток турбин обеспечивает повышение их надежности и ресурса.

Ключевые слова: охлаждаемая рабочая лопатка турбины, перфорационное отверстие, монокристаллический жаропрочный никелевый сплав, азимутальная кристаллографическая ориентация, расчетная модель, тепловое состояние, напряженное состояние.

Введение и постановка задачи

Применяемые при создании современных охлаждаемых рабочих лопаток турбин монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы и методы управления процессами их кристаллизации во многом определяют конструктивные решения, работоспособность и надежность лопаток. При этом технологические возможности производства монокристаллических лопаток и формирование оптимальной структуры с необходимым уровнем характеристик конструкционной прочности, обеспечивающих требуемый ресурс, нередко связывают с аксиальной кристаллографической ориентацией (ориентация продольной оси монокристаллической лопатки, недооценивая влияние ее азимутальной ориентации (ориентация поперечных осей) на ее напряженно-деформированное состояние. Известно, что вследствие анизотропии свойств монокристалла, возможное изменение азимутальной ориентации для характерной аксиальной ориентации $\langle 001 \rangle$ монокристаллической охлаждаемой лопатки приводит к изменению модуля упругости в поперечном направлении в 1,7 раза [1]. В условиях неоднородности распределения температур в лопатке это может привести к существенной зависимости напряженного состояния охлаждаемой монокристаллической лопатки от выбора ее азимутальной ориентации [2–4].

Вместе с тем следует отметить, что современные охлаждаемые лопатки обладают развитой системой охлаждающих каналов и перфораци-

онных отверстий. Эти зоны являются наиболее опасными с точки зрения прочности зонами лопатки, где наблюдается не только значительная неравномерность распределения температур, но и высокий уровень концентрации напряжений. Поэтому возникает необходимость оценки влияния азимутальной ориентации на напряженность монокристаллической охлаждаемой лопатки в зонах повышенной неравномерности температур и концентрации напряжений, что и является целью данной работы.

Объект исследования и его расчетные модели

С этой целью в качестве объекта исследования в работе рассматривается охлаждаемая монокристаллическая рабочая лопатка ТВД двигателя Д18-Т, изготавливаемая из сплава ЖС32-ВИ, модели фрагмента пера которой представлены на рис. 1. Исходная конструкция рабочей лопатки (см. рис. 1, а) имеет двухрядную систему перфорационных отверстий на входной кромке с диаметром $d = 0,6$ мм и углом наклона к внешней поверхности пера $\alpha = 45^\circ$. Модернизация системы перфорационных отверстий на входной кромке лопатки позволила повысить эффективность системы охлаждения данной лопатки. В ходе расчетно-экспериментальных исследований была разработана наиболее оптимальная с точки зрения охлаждения трехрядная система перфорационных отверстий на входной кромке с диаметром $d = 0,5$ мм и углом наклона к внешней поверхности пера $\alpha = 60$ (см. рис. 1, б).

Результаты расчетов и анализ НДС

Первоначально для установления закономерностей влияния азимутальной ориентации на напряженность монокристаллической охлаждаемой лопатки методом конечных элементов были проведены расчеты ее теплового состояния на установившемся максимальном взлетном режиме двигателя. Распределения температур на входной кромке пера охлаждаемой рабочей лопатки ТВД с исходной и модернизированной системами перфорационных отверстий показаны на рис. 2. Данные теплового состояния рассматриваемой рабочей лопатки ТВД на взлетном режиме двигателя, которые приведены в табл. 1, свидетельствуют об уменьшении как максимальной T_{max} , так и минимальной T_{min} температуры в окрестности перфорационного отверстия на входной кромке лопатки с модернизированной системой перфорационных отверстий. При этом, в модернизированной лопатке по сравнению с ее исходной конструкцией лишь незначительно возрастает перепад температур ΔT в окрестности пер-

форационного отверстия, но при этом температура T_k в наиболее напряженной точке отверстия, расположенной на границе пересечения перфорационного отверстия с охлаждающим каналом, значительно ниже. Поэтому, наряду с влиянием параметров отверстий на характеристики напряженно-деформированного состояния рассматриваемых конструкций монокристаллической охлаждаемой рабочей лопатки ТВД, существенное влияние оказывает и их тепловое состояние.

Таблица 1 – Значения характеристик температурного состояния рассматриваемых конструкций рабочей лопатки ТВД на взлетном режиме эксплуатации двигателя

Тип конструкции рабочей лопатки ТВД	T_{min} , °C	T_{max} , °C	ΔT , °C	T_k , °C
исходная	878	1009	131	889
модернизированная	820	957	137	831

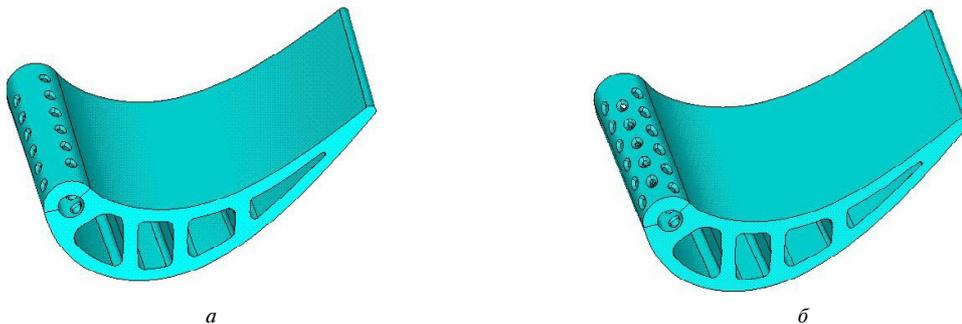


Рис. 1. Модели фрагмента пера охлаждаемой рабочей лопатки ТВД с исходной (а) и модернизированной (б) системами перфорационных отверстий

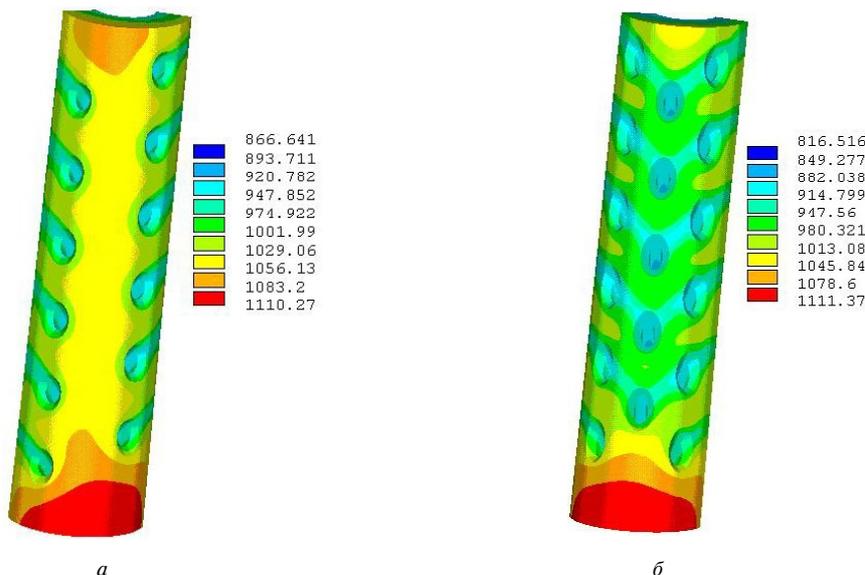


Рис. 2. Температурное состояние входной кромки пера охлаждаемой рабочей лопатки ТВД с исходной (а) и модернизированной (б) системами перфорационных отверстий

Для установления закономерностей влияния азимутальной ориентации на долговечность и надежность исследуемой монокристаллической охлаждаемой рабочей лопатки, были использованы конечноэлементные модели фрагментов исходной и модернизированной лопатки (см. рис. 1), а в качестве критерия оценки – относительное изменение уровня эквивалентных напряжений в наиболее напряженной точке перфорационного отверстия, при различной азимутальной ориентации лопатки. Здесь следует отметить, что в работе рассматривались модели фрагментов монокристаллических лопаток, продольная ось которых совпадает с кристаллографическим направлением $\langle 001 \rangle$. Как известно [4], 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.

Изменяя положение главных осей монокристалла x, y относительно осей лопатки x', y' в плоскости поперечного сечения на угол φ (рис. 3), определялось влияние азимутальной ориентации на напряженное состояние лопатки в наиболее напряженной точке перфорационного отверстия.

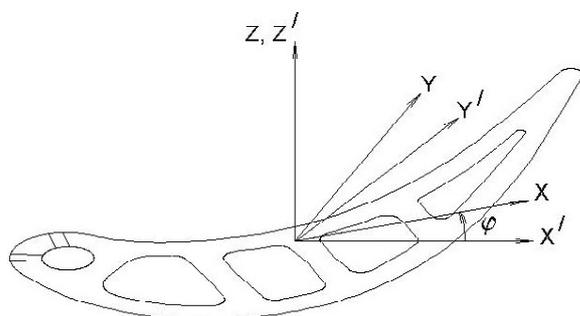


Рис. 3. Системы декартовых координат, описывающих главные оси монокристалла (x, y, z) и положение поперечного сечения лопатки (x', y', z')

Влияние азимутальной ориентации представлено плоскими замкнутыми кривыми, когда одно из направлений в кристалле (в данном случае $\langle 001 \rangle$) зафиксировано, а два других вращаются вокруг первого, не изменяя положения самого кристалла в пространстве. Каждая точка замкнутой кривой определяет относительный уровень эквивалентных напряжений в наиболее напряженной точке перфорационного отверстия при различной азимутальной ориентации для выбранного кристаллографического направления $\langle 001 \rangle$ продольной оси лопатки. Для исследуемых исходной и модернизированной монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток на

рис. 4 в таком виде приведены относительные распределения эквивалентных напряжений (K_σ) в наиболее напряженной точке перфорационного отверстия в зависимости от азимутальной ориентации лопатки (φ) при отсутствии отклонения ее продольной оси.

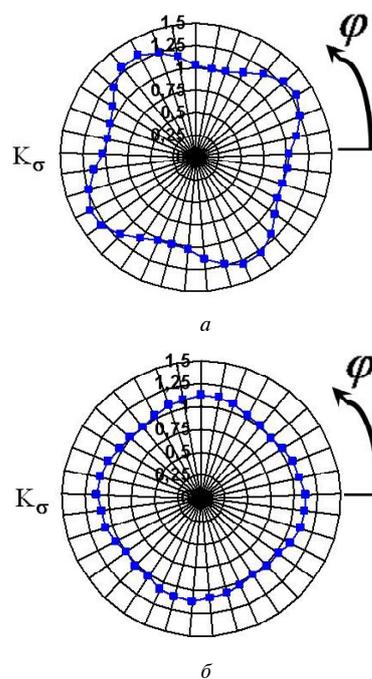


Рис. 4. Распределения относительных эквивалентных напряжений в наиболее напряженной точке перфорационного отверстия исходной (а) и модернизированной (б) монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток от азимутальной ориентации исходной лопатки

Анализ результатов расчетов показывает, что для исходной лопатки влияние азимутальной ориентации достигает 27 %, а для модернизированной не превышает 13 %.

Основываясь на механизмах деформирования и разрушения монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов, для оценки влияния азимутальной ориентации на напряженное состояние охлаждаемых монокристаллических лопаток были также определены приведенные к действующим системам скольжения касательные напряжения [3]. Опыт эксплуатации исследуемых лопаток показывает, что деформирование и разрушение монокристаллов рассматриваемых материалов в перфорационных отверстиях преимущественно осуществляется в октаэдрических системах скольжения независимо от изменения азимутальной ориентации [1, 5].

В виде замкнутых кривых на рис. 5 для исследуемых исходной и модернизированной монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток приведены относительные распределения эквивалентных напряжений (K_σ) в наиболее на-

пряженной точке перфорационного отверстия в зависимости от азимутальной ориентации лопатки (φ) при отсутствии отклонения ее продольной оси.

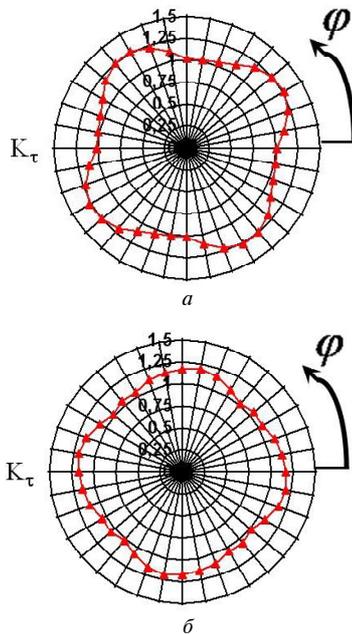


Рис. 5. Распределения относительных приведенных касательных напряжений в наиболее напряженной точке перфорационного отверстия исходной (а) и модернизированной (б) монокристаллических охлаждаемых рабочих лопаток от азимутальной ориентации исходной лопатки

Как видно (см. рис. 4 и 5), распределения относительных эквивалентных и приведенных касательных напряжений для конкретной лопатки обладают общими закономерностями.

С другой стороны, при модернизации системы перфорационных отверстий, изменяется вид распределений относительных эквивалентных и приведенных касательных напряжений в зависимости от азимутальной ориентации лопатки. Оптимальное азимутальное расположение главных осей монокристалла по отношению к осям исходной лопатки в плоскости ее поперечного сечения, при котором имеет место минимальный уровень максимальных напряжений для лопатки с кристаллографическим направлением $\langle 001 \rangle$, соответствует $\varphi = -10^\circ$. Однако, для модернизированной лопатки такая азимутальная ориентация уже не соответствует минимальному уровню максимальных напряжений. Более того, она соответствует максимальному уровню напряжений в лопатке, как это видно из распределения напряжений, а минимальный уровень максимальных напряжений для модернизированной лопатки с кристаллографическим направлением $\langle 001 \rangle$, соответствует $\varphi = -40^\circ$.

Анализ результатов расчетов показывает, что с учетом сдвигового механизма деформирования и разрушения монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов для исходной лопатки влияние азимутальной ориентации в наиболее напряженной точке перфорационного отверстия достигает 25 %, что практически совпадает с результатами, полученными при анализе распределения относительных эквивалентных напряжений. Для модернизированной лопатки влияние азимутальной ориентации возросло до 18 %. Таким образом, полученные зависимости говорят о существовании оптимального азимутального расположения главных осей монокристалла по отношению к осям лопатки в плоскости ее поперечного сечения и значительном влиянии азимутальной ориентации на напряженное состояние охлаждаемой монокристаллической лопатки.

Заключение

На основании анализа результатов расчета монокристаллической охлаждаемой лопатки в зонах повышенной неравномерности температур и концентрации напряжений было установлено:

1. Для достоверного выбора азимутальной ориентации монокристаллических лопаток необходимо охарактеризовать их сложное напряженное состояние в целом, основываясь на механизмах деформирования и разрушения монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов.

2. Прочность и надежность монокристаллической лопатки могут быть повышены за счет рациональной регламентации азимутальной ориентации в наиболее опасной зоне ее пера.

Разработанная наиболее эффективная, с точки зрения охлаждения, система перфорационных отверстий на входной кромке охлаждаемой монокристаллической рабочей лопатки позволяет уменьшить влияние азимутальной ориентации на ее напряженность.

Список литературы

1. Шалин Р. Е. Жаропрочность сплавов для газотурбинных двигателей / Р. Е. Шалин, И. П. Булыгин, Е. Р. Голубовский – М.: Металлургия, 1981. – 120 с.
2. Придорожный Р. П. Расчетное исследование объемного напряженного состояния монокристаллической охлаждаемой лопатки турбины / Р. П. Придорожный // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2002. – Вип. 34. – С. 119–123.
3. Придорожный Р. П. Особенности влияния кристаллографической ориентации на усталостную прочность монокристаллических рабочих лопаток турбин / Р. П. Придорожный, А. В. Шереметьев // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2005. – № 10 (26). – С. 55–59.

4. Придорожный Р. П. Особенности азимутальной кристаллографической ориентации охлаждаемых рабочих лопаток турбин / Р. П. Придорожный, А. В. Шереметьев, А. П. Зиньковский // Вестник двигателестроения. – 2011. – № 1. – С. 58–62.
5. Экспериментальная оценка характеристик многоциклового усталости монокристаллических образцов и рабочих охлаждаемых лопа-

ток из никелевых сплавов / [Е. Р. Голубовский, А. Н. Стадников, С. А. Черкасова, А. Н. Петухов] // 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.

Поступила в редакцию 26.12.2012

Придорожный Р.П., Шереметьев О.В., Зиньковский А.П. Оцінка впливу азимутальної орієнтації на напруженість монокристалічної охолоджуваної лопатки у системі перфораційних отворів

У статті досліджено вплив азимутальної кристаллографічної орієнтації на міцність монокристалічних охолоджуваних робочих лопаток турбін з урахуванням особливостей їх системи перфораційних отворів. Встановлено, що поліпшення ефективності системи охолодження та раціональний вибір азимутальної кристаллографічної орієнтації монокристалічних охолоджуваних робочих лопаток турбін забезпечує підвищення їх надійності і ресурсу.

Ключові слова: охолоджувана робоча лопатка турбіни, перфораційний отвір, монокристалічний жароміцний нікелевий сплав, азимутальна кристаллографічна орієнтація, розрахункова модель, тепловий стан, напружений стан.

Pridorozhny R., Sheremetiev A., Zinkovskiy A. Assessment of effect of azimuth orientation on stressed state of single-crystal cooled turbine blade with pin holes system

The paper investigates the effect of azimuthal crystallographic orientation on strength of single-crystal cooled rotor blades with account of peculiar features of their pin holes system. It has been established that improvement of efficiency of cooling system and rational choice of azimuthal crystallographic orientation of cooled single-crystal turbine blades enhances blades reliability and durability.

Key words: cooled turbine rotor blade, pin hole, single-crystal high-temperature nickel alloy, azimuthal crystallographic orientation, computational model, thermal state, stressed state.