

Влияние кристаллографической ориентации на спектр собственных колебаний и предел выносливости монокристаллических рабочих лопаток турбин

Р. П. Придорожный^а, А. В. Шереметьев^а, А. П. Зиньковский^б

^а ГП ЗМКБ “Прогресс” им. А. Г. Ивченко, Запорожье, Украина

^б Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

С использованием трехмерных моделей монокристаллических рабочих лопаток установлены закономерности влияния кристаллографической ориентации осей материала на формирование спектра собственных частот и форм их колебаний. Предложен расчетно-экспериментальный метод определения предела выносливости монокристаллических лопаток, что позволяет значительно сократить объем испытаний при одновременном повышении достоверности их результатов.

Ключевые слова: монокристаллическая рабочая лопатка, кристаллографическая ориентация, спектр собственных колебаний, усталостная прочность.

Введение. Одними из наиболее напряженных конструктивных элементов современных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), которые в значительной мере определяют их эффективность, являются рабочие лопатки турбин. Это объясняется непрерывно возрастающим уровнем действующих на них нагрузок и температур. Поэтому, учитывая требования существенного повышения ресурса ГТД при одновременном сокращении затрат на этапах от проектирования и производства до эксплуатации [1, 2], проблема обеспечения надежности рабочих лопаток турбин остается актуальной. Ее решение невозможно без совершенствования их конструкции и применения новых материалов, в частности монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов с направленной кристаллизацией [3, 4]. Внедрение таких материалов, как установлено многочисленными исследованиями и практикой создания современных двигателей, позволяет в два-три раза увеличить ресурс турбинных рабочих лопаток [4, 5]. Однако при этом усложняется анализ как статической, так и динамической прочности. Это обусловлено тем, что рассматриваемые лопатки, в отличие от поликристаллических с равноосной структурой, обладают существенной анизотропией механических свойств [3]. Кроме того, одним из основных требований отливки лопаток является совпадение их продольной оси с кристаллографическим направлением $\langle 001 \rangle$ монокристалла. Однако в производстве монокристаллических лопаток допускается отклонение их продольной оси от этого направления. При этом азимутальная ориентация осей материала обычно не регламентируется. Естественно, что эти факторы оказывают влияние на спектр собственных частот колебаний рассматриваемых лопаток, знание которого обязательно как для предупреждения возникновения их опасных вибрационных состояний, так и для проведения испытаний на усталость. Однако осуществление таких испытаний усложняется отмеченной анизотропией механических свойств монокристаллических материалов. Поэтому необходимо прово-

дуть усталостные испытания лопаток для каждой заданной кристаллографической ориентации осей материала.

Цель работы с учетом изложенного – обобщение результатов проведенных расчетно-экспериментальных исследований по определению закономерностей влияния кристаллографической ориентации осей материала на спектр собственных колебаний и предел выносливости монокристаллических рабочих лопаток турбин.

Объекты исследования и их моделирование. Повышение максимальной температуры газа перед турбиной как один из определяющих факторов достижения эффективности современных газотурбинных двигателей обуславливает создание более высокотемпературных и нагруженных охлаждаемых и неохлаждаемых рабочих лопаток. Поэтому для исследования выбирали турбинные лопатки из жаропрочного сплава ЖС26 на никелевой основе с гранцентрированной кубической (ГЦК) решеткой (рис. 1).

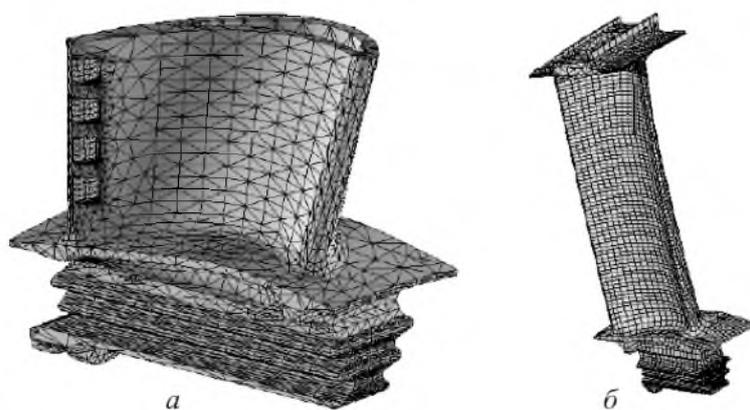


Рис. 1. Охлаждаемая (а) и неохлаждаемая (б) рабочие лопатки турбины.

Предположим, что декартовы координаты x , y и z совпадают с главными кристаллографическими осями $\langle 100 \rangle$, $\langle 010 \rangle$ и $\langle 001 \rangle$ монокристалла соответственно, а положение поперечного сечения лопатки определяется декартовой системой координат $x'y'z'$ (рис. 2). Поскольку, как уже отмечалось, кристаллографическое направление $\langle 001 \rangle$ монокристалла согласно условиям проектирования должно совпадать с продольной осью z' лопатки, примем, что направление его осей $\langle 010 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$ относительно осей поперечного сечения пера лопатки соответствует окружной координате y' ротора и оси x' двигателя.

Аксиальная ориентация продольной оси лопаток относительно главных осей монокристалла характеризуется углом α , который, как показано на рис. 3, в соответствии с допусками на их отливку может достигать 20° , а азимутальная – углом φ (рис. 2).

Учитывая тенденции в развитии газотурбостроения, характерной особенностью турбинных лопаток является усложнение их конструктивных форм. Так, современные охлаждаемые лопатки турбин имеют большое количество внутренних каналов и развитую структуру интенсификаторов охлаждения, отверстий перетекания, щелей и перфорации. Кроме того, для лопа-

ток турбин высокого давления характерно как отсутствие, так и наличие бандажных полок, что требует интенсивного их охлаждения.

Неохлаждаемые рабочие лопатки, которые, как правило, применяются в турбинах низкого давления и вентиляторе, а также в свободных турбинах, выполняются с первоначальной закруткой периферийного сечения относительно корневого на угол $30...50^\circ$.

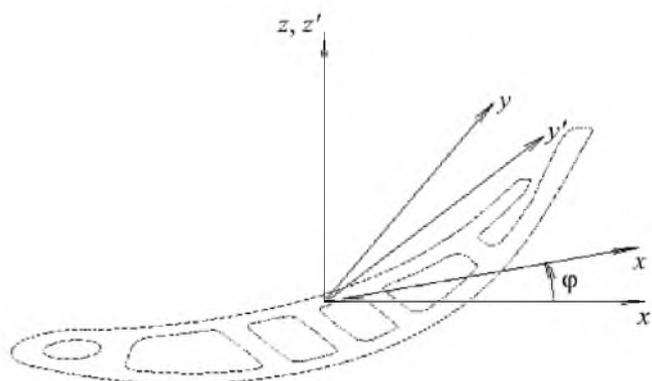


Рис. 2. Системы декартовых координат (xyz) и $(x'y'z')$, описывающих главные оси монокристалла и положение поперечного сечения лопатки соответственно.

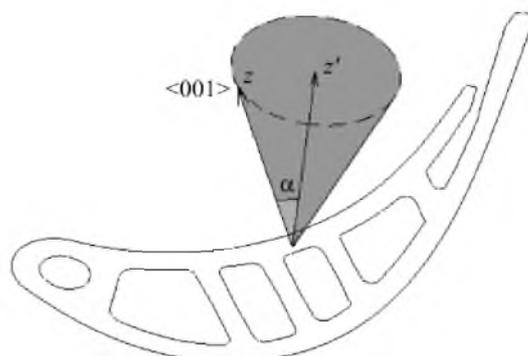


Рис. 3. Область допустимых значений угла α , характеризующего отклонение продольной оси лопатки z' от кристаллографического направления $z <001>$.

Такие конструктивные особенности лопаток требуют соответствующих подходов к их моделированию. Для достижения сформулированной цели используются трехмерные конечноэлементные модели (рис. 1), которые позволяют достаточно полно учитывать конструктивно-технологические факторы на этапах проектирования и производства лопаток, свойства применяемых материалов и влияние эксплуатационных режимов нагружения. Это дает возможность задать любую кристаллографическую ориентацию осей монокристалла относительно осей лопатки.

При выборе расчетной модели лопатки предполагалась жесткая ее заделка по контактирующим поверхностям хвостовика, поскольку усилие, с которым она прижимается к диску по указанным поверхностям на рабочих режимах двигателя, значительно выше усилия, по достижении которого частота колебаний остается практически неизменной [6].

Спектр собственных колебаний. Отдельные аспекты влияния кристаллографической ориентации осей материалов на характеристики собственных колебаний монокристаллических рабочих лопаток турбин представлены ранее [7] и в работах [8, 9]. В соответствии с постановкой задачи ниже изложены результаты дальнейших исследований в данном направлении, полученные с использованием разработанных трехмерных конечноэлементных моделей выбранных лопаток (рис. 1).

Рассмотрим результаты выполненных вычислительных экспериментов в предположении точного совпадения продольной оси z' лопаток с кристаллографическим направлением $\langle 001 \rangle$ ($\alpha = 0$). Расчеты проводили как для условий неработающего двигателя (температура газа перед турбиной $T_T = 20^\circ\text{C}$, частота вращения ротора $n = 0$ об/мин), так и взлетного режима эксплуатации, характеризующегося соответствующим распределением температур и частотой вращения ротора. Полученные частотные спектры приведены в работе [7]. В табл. 1 и 2 в качестве примера представлены численные результаты определения собственных частот некоторых форм колебаний исследуемых лопаток в случае неработающего двигателя. Для подтверждения обоснованности расчетных моделей лопаток и достоверности полученных на их основе результатов в таблицах приведены также данные испытаний лопаток на вибростенде, что соответствует принятым параметрам эксплуатации двигателя. Сравнение полученных результатов показывает в целом их хорошее согласование, что свидетельствует о правомерности использования выбранных расчетных моделей. Отличие экспериментальных данных от численных в первую очередь объясняется тем, что для реальных лопаток характерно отклонение продольной оси от кристаллографического направления $\langle 001 \rangle$, т.е. $\alpha \neq 0$. Такой вывод наглядно подтверждается данными испытаний лопаток по первой форме колебаний.

Т а б л и ц а 1

Результаты расчетного и экспериментального определения собственных частот колебаний охлаждаемой лопатки при совпадении ее продольной оси с кристаллографическим направлением $\langle 001 \rangle$

№ формы колебаний j	Значения собственных частот колебаний		
	Расчет	Эксперимент	
	f_j , Гц	Количество испытанных лопаток, N	f_j , Гц
1	11924	20	11010...13059
2	17991	5	17135...18000

Для подтверждения вывода о причинах разброса экспериментальных данных были проведены вычислительные эксперименты по установлению закономерностей влияния изменения кристаллографической ориентации продольной оси лопаток на частоты их собственных колебаний. Решение этой задачи, учитывая симметрию ГЦК-решетки монокристалла, осуществлялось в рамках стереографического треугольника $\langle 001 \rangle - \langle 111 \rangle - \langle 011 \rangle$ [3]. При этом, принимая во внимание характер изменения модуля упругости и модуля

сдвига в пределах этого треугольника [10], рассматривали только возможное отклонение продольной оси лопатки от кристаллографического направления $\langle 001 \rangle$ вдоль границ $\langle 001 \rangle - \langle 111 \rangle$ и $\langle 001 \rangle - \langle 011 \rangle$.

Т а б л и ц а 2

Результаты расчетного и экспериментального определения собственных частот колебаний неохлаждаемой лопатки при совпадении ее продольной оси с кристаллографическим направлением $\langle 001 \rangle$

№ формы колебаний j	Значения собственных частот колебаний		
	Расчет f_j , Гц	Эксперимент	
		Количество испытанных лопаток, N	f_j , Гц
1	590	101	539..685
2	1702	1	1500
3	2667	1	2728
4	3236	1	3175
5	6032	1	5950
6	7492	1	6780
7	9283	1	8020
8	11002	1	10726

Результаты расчетов представлены на рис. 4 и 5 для исследуемых охлаждаемых и неохлаждаемых лопаток соответственно в виде зависимостей собственных частот некоторых форм колебаний от величины углов φ и α .

Видно, что если для неохлаждаемой лопатки практически для всех рассмотренных форм колебаний наблюдается повышение собственных частот при отклонении продольной оси от направления $\langle 001 \rangle$ (рис. 5), то для охлаждаемой лопатки такая закономерность отсутствует (рис. 4).

Анализ представленных данных показывает, что влияние азимутальной ориентации продольной оси монокристалла на собственные частоты колебаний лопаток незначительно. Так, для неохлаждаемой лопатки разброс максимальных $f_{j \max}$ и минимальных $f_{j \min}$ собственных частот колебаний, который определяется как $\Delta f_j = 100(f_{j \max} - f_{j \min})/f_{j \min}$, в выбранном диапазоне изменения угла φ не превышает 1%, для охлаждаемой – 5% (j – номер формы колебаний). Однако отметим, что ее влияние на крутильные формы колебаний ($j = 2, 4$) охлаждаемой лопатки существеннее, чем на изгибные формы колебаний ($j = 1, 3$).

Более значительное влияние на спектр собственных частот колебаний лопаток оказывает аксиальная ориентация монокристалла. Так, если для охлаждаемой лопатки разброс частот Δf_j в выбранном диапазоне изменения угла α для рассматриваемых форм колебаний не превышает 11%, то для неохлаждаемой он достигает 38%. При этом прослеживается тенденция к уменьшению влияния аксиальной ориентации монокристалла на величину разброса собственных частот колебаний лопаток с увеличением номера формы колебаний.

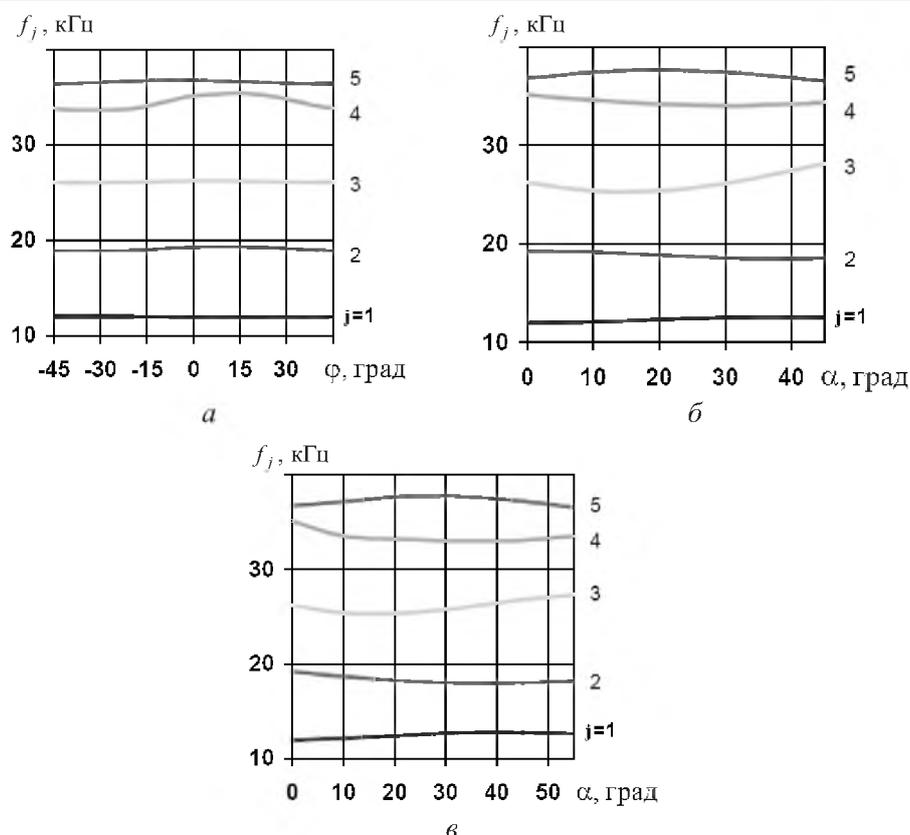


Рис. 4. Изменение собственных частот некоторых форм колебаний охлаждаемой лопатки в зависимости от величины азимутального (а) и аксиального к направлениям $\langle 011 \rangle$ (б) и $\langle 111 \rangle$ (в) отклонений продольной оси.

Изменение кристаллографической ориентации осей лопаток может оказывать влияние не только на собственные частоты, но и на форму колебаний лопаток. Результаты выполненных вычислительных экспериментов по изучению ее влияния на форму колебаний лопаток в исследуемом диапазоне собственных частот колебаний свидетельствуют, что независимо от кристаллографической ориентации формы колебаний охлаждаемой лопатки идентичны, в то время как некоторые формы колебаний неохлаждаемой лопатки могут несколько видоизменяться.

Таким образом, как следует из представленных данных, разброс собственных частот колебаний монокристаллических лопаток из-за технологических допусков и нарушений кристаллографической ориентации может достигать 40% в отличие от такового для поликристаллических лопаток, для которых он обусловлен только технологическими допусками на изготовление и обычно не превышает 15%.

Из приведенных на рис. 4 и 5 зависимостей видно, что в рамках существующего допустимого отклонения продольной оси от направления $\langle 001 \rangle$ (рис. 3) разброс собственных частот колебаний монокристаллических лопаток не превышает 10%, что сопоставимо с таковым вследствие технологических допусков. В то же время необходимо отметить, что если такое

отклонение не превышает 10° , то обусловливаемый им разброс собственных частот колебаний составит менее 3%, что существенно меньше разброса вследствие технологических допусков. Поэтому ограничение отклонения продольной оси лопатки от направления $\langle 001 \rangle$ позволяет значительно уменьшить суммарный разброс собственных частот колебаний и, как следствие, вероятность попадания отдельных лопаток в резонанс на рабочих режимах двигателя. При этом уровень опасных динамических напряжений венца увеличивается. Кроме того, в таком случае существенно упрощается отстройка лопаток от возможных их резонансных состояний.

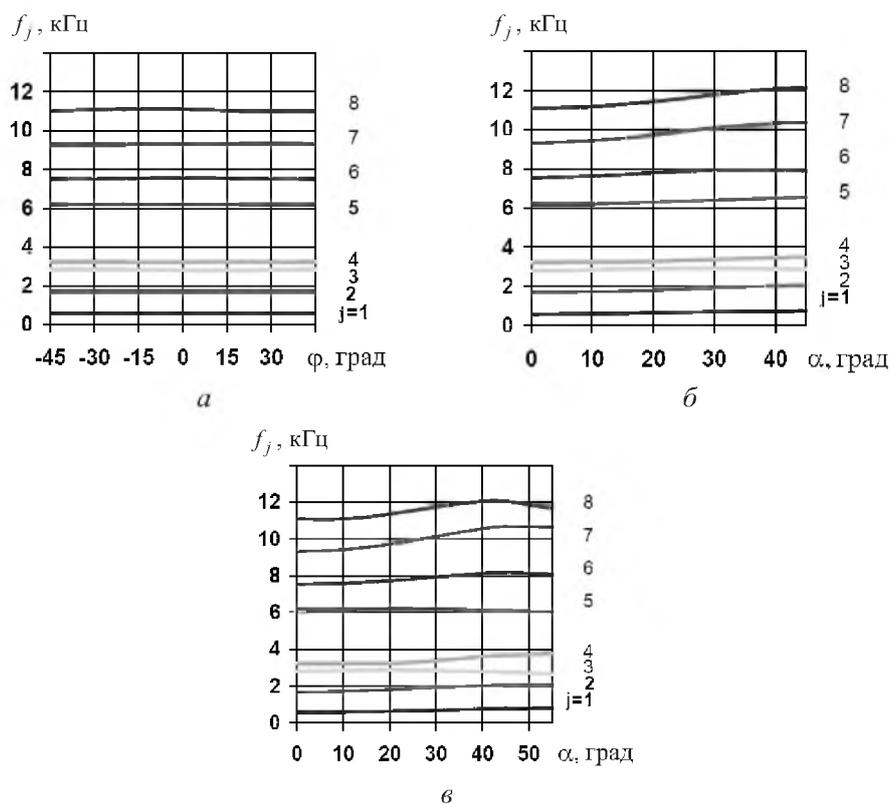


Рис. 5. Изменение собственных частот некоторых форм колебаний неохлаждаемой лопатки в зависимости от величины азимутального (а) и аксиального к направлениям $\langle 011 \rangle$ (б) и $\langle 111 \rangle$ (в) отклонений продольной оси.

Расчетно-экспериментальный метод определения предела выносливости монокристаллических лопаток. Учитывая существенную анизотропию характеристик механических свойств монокристаллических материалов, их применение как один из возможных способов повышения сопротивления усталости рабочих лопаток турбин требует уточнения известных и разработки новых методов по определению и оценке предела выносливости.

В отличие от лопаток из материалов с равноосной структурой, в случае использования монокристаллических материалов с определенной кристаллографической ориентацией необходимо проводить испытания партий лопаток для каждой заданной ориентации. Поэтому был разработан метод опреде-

ления предела выносливости монокристаллических лопаток с любой заданной кристаллографической ориентацией при существенном сокращении затрат на проведение испытаний. Рассмотрим его основные положения.

Известно, что за предел выносливости лопатки принимается то наибольшее значение максимальных напряжений, действующих на поверхности ее пера, при котором не происходит разрушение до $N = 2 \cdot 10^7$ цикл. Для его установления напряжения, определяемые на основании показаний основного тензорезистора, наклеенного в удобном месте пера лопатки, пересчитываются с учетом заданной формы колебаний на место действия максимальных напряжений. Таким образом, одним из основных моментов при испытаниях рабочих лопаток на усталость является знание их формы колебаний, позволяющей определить коэффициент пересчета напряжений K как отношение величин приведенных максимальных напряжений в пере лопатки и регистрируемых в месте расположения основного тензорезистора.

При существующих подходах к проведению усталостных испытаний лопаток из материалов с равноосной структурой лопатки препарированы тензорезисторами для определения распределения относительных максимальных динамических напряжений (формы колебаний) и соответственно коэффициента пересчета напряжений K . Применительно к монокристаллическим лопаткам такой метод обладает следующими недостатками.

1. Сложная форма лопатки, наличие охлаждающих каналов и интенсификаторов охлаждения затрудняют ее тензометрирование, что не позволяет с достаточной точностью определить, в каком месте напряжения максимальны.

2. Коэффициент пересчета напряжений K определяется для лопатки с конкретной кристаллографической ориентацией без учета механизмов деформирования и разрушения монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов.

Преодолеть указанные недостатки можно с помощью предложенного расчетно-экспериментального метода. С использованием разработанных трехмерных конечноэлементных моделей монокристаллических лопаток (рис. 1) проводится расчет спектра их собственных колебаний в зависимости от кристаллографической ориентации. Используя форму колебаний как масштабный множитель, на основе данных испытаний рабочих лопаток на вибростенде или на работающем двигателе динамические напряжения, а следовательно, и коэффициент пересчета напряжений K могут быть определены в любой точке пера с учетом механизмов деформирования и разрушения монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов. Таким образом, достаточно показаний основного тензорезистора, размещенного в удобном месте лопатки любой кристаллографической ориентации, чтобы определить предел выносливости лопатки с другой заданной кристаллографической ориентацией.

Для подтверждения предложенного подхода проводили испытания монокристаллических лопаток по определению спектра их собственных колебаний и предела выносливости при колебаниях по первым изгибной и крутильной формам, как наиболее часто реализуемым в условиях эксплуатации двигателей, а также комплекс вычислительных экспериментов, моделирующих такие испытания.

В качестве основного критерия усталостной прочности монокристаллической лопатки использовали критическое напряжение сдвига по плоскости скольжения, приведенное к направлению скольжения, которое по закону Боаса–Шмида является постоянной величиной для сплава и его структурного состояния и не зависит от ориентации главных осей монокристалла [3].

Режим испытаний на усталость каждой лопатки задается и контролируется по показаниям основного тензорезистора, наклеенного в определенной части ее пера в зависимости от формы колебаний. При колебаниях по первой изгибной форме – это, как правило, спинка корневого сечения лопатки независимо от ее типа. В случае крутильной формы колебаний были выбраны: для неохлаждаемой лопатки – спинка периферийного сечения, для охлаждаемой – участок поверхности ее пера между спинкой и выходной кромкой прикорневого сечения.

Полученные зависимости изменения коэффициента пересчета от азимутальной и аксиальной ориентаций продольной оси лопаток относительно главных осей монокристалла позволяют судить о влиянии кристаллографической ориентации на их предел выносливости. Данные его оценки для исследуемых лопаток по первой изгибной форме колебаний представлены в [11]. Рассмотрим результаты определения предела выносливости охлаждаемой и неохлаждаемой монокристаллических лопаток при колебаниях по первой крутильной форме и проведем их сравнение с таковыми, полученными при колебаниях по первой изгибной форме.

Анализ выполненных расчетных и экспериментальных исследований показывает, что при колебаниях неохлаждаемой лопатки по первой крутильной форме критическими зонами с точки зрения сопротивления усталости являются зоны со стороны корыта и спинки, расположенные ближе к входной кромке периферийного сечения.

Изменение коэффициента пересчета K_T по максимальным приведенным касательным напряжениям в зависимости от азимутальной ориентации для рассматриваемой лопатки в случае совпадения ее продольной оси z' с кристаллографическим направлением $\langle 001 \rangle$ показано на рис. 6. Видно, что вследствие кристаллографической симметрии монокристалла изменение угла φ между главными осями кристалла и лопатки в плоскости ее поперечного сечения рассматривается в пределах 90° . Приведенные результаты показывают, что при определенной кристаллографической ориентации продольной оси лопатки, в отличие от данных, полученных при колебаниях по первой изгибной форме, вероятность зарождения трещины в той или иной зоне пера разная. Так, если при колебаниях лопатки по первой изгибной форме изменение величины коэффициента пересчета не превышало 7%, то при колебаниях по первой крутильной форме со стороны корыта оно составляет 20%, со стороны спинки – 41%, что свидетельствует о значительном влиянии азимутальной ориентации продольной оси неохлаждаемой лопатки на ее предел выносливости.

Что касается охлаждаемой рабочей лопатки турбины, то результаты усталостных испытаний и вычислительных экспериментов свидетельствуют,

что зоны разрушения ее пера могут находиться как на внешнем контуре, так и на внутренней поверхности стенок. Это хорошо видно на рис. 7, где приведено изменение коэффициента пересчета в опасных зонах пера при колебаниях лопатки по первой крутильной форме в зависимости от азимутальной ориентации, когда ее продольная ось совпадает с кристаллографическим направлением $\langle 001 \rangle$. При определенной кристаллографической ориентации вероятность зарождения трещины в той или иной зоне разная, что справедливо и для первой изгибной формы колебаний. Однако если при этой форме колебаний изменение величины коэффициента пересчета в каждой конкретной зоне не превышает 10%, то при колебаниях по первой крутильной форме оно достигает 45%.

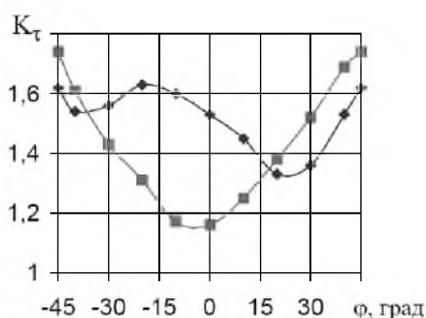


Рис. 6

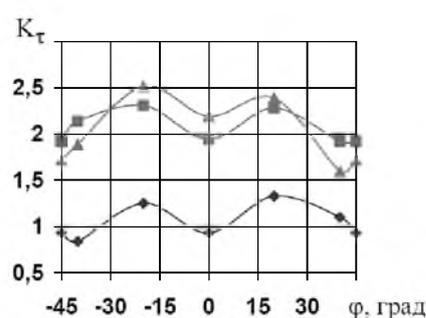


Рис. 7

Рис. 6. Изменение коэффициента пересчета по приведенным касательным напряжениям в зависимости от азимутальной ориентации продольной оси неохлаждаемой лопатки в характерных зонах ее пера: \blacklozenge – со стороны корыта, ближе к входной кромке периферийного сечения; \blacksquare – со стороны спинки, ближе к входной кромке периферийного сечения.

Рис. 7. Изменение коэффициента пересчета по приведенным касательным напряжениям в зависимости от азимутальной ориентации продольной оси охлаждаемой лопатки в характерных зонах ее пера: \blacklozenge – корыто, вблизи щелевого отверстия на выходной кромке среднего сечения; \blacksquare – нижний угол щелевого отверстия на выходной кромке прикорневого сечения; \blacktriangle – перегородка между верхними щелевыми отверстиями во внутреннем канале.

Таким образом, можно заключить, что влияние азимутальной ориентации продольной оси исследуемых лопаток на предел выносливости зависит от формы их колебаний.

Рассмотрим возможное влияние на предел выносливости лопаток отклонения их продольной оси от направления $\langle 001 \rangle$ к направлениям $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ вдоль границ стереографического треугольника $\langle 001 \rangle$ – $\langle 011 \rangle$ и $\langle 001 \rangle$ – $\langle 111 \rangle$ при фиксированной азимутальной ориентации.

На рис. 8 представлены результаты расчетов для неохлаждаемой лопатки. Их анализ показывает, что изменение величины коэффициента пересчета при выбранном отклонении продольной оси лопатки к направлению $\langle 011 \rangle$ составляет до 20%, к направлению $\langle 111 \rangle$ – до 29%, что несколько выше, чем для колебаний по первой изгибной форме, соответственно 16 и 24%. Кроме того, в этом случае претерпевает изменение форма колебаний лопатки, что также оказывает существенное влияние на величину коэффициента пересчета.

Отметим, что в отличие от колебаний лопатки по первой изгибной форме, когда независимо от кристаллографической ориентации вероятность разрушения по входной кромке выше, чем в остальных зонах пера, при колебаниях по первой крутильной форме она в той или иной зоне пера зависит от кристаллографической ориентации.

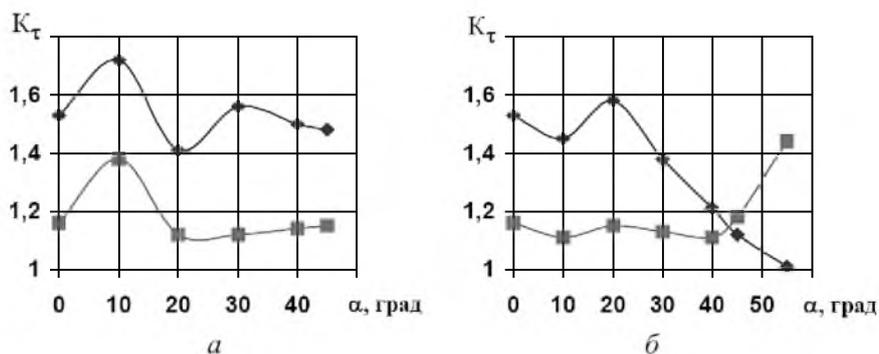


Рис. 8. Изменение коэффициента пересчета по приведенным касательным напряжениям в зависимости от аксиальной ориентации к направлениям $\langle 011 \rangle$ (а) и $\langle 111 \rangle$ (б) продольной оси неохлаждаемой лопатки в характерных зонах ее пера: ◆ – со стороны корыта, ближе к входной кромке периферийного сечения; ■ – со стороны спинки, ближе к входной кромке периферийного сечения.

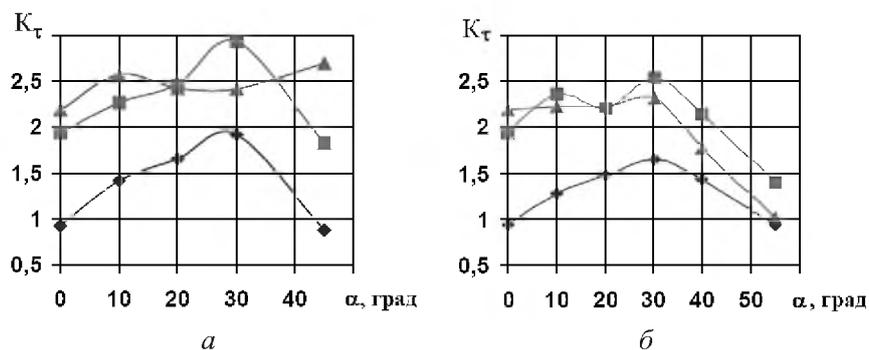


Рис. 9. Изменение коэффициента пересчета по приведенным касательным напряжениям в зависимости от аксиальной ориентации к направлениям $\langle 011 \rangle$ (а) и $\langle 111 \rangle$ (б) продольной оси охлаждаемой лопатки в характерных зонах ее пера: ◆ – корыто, вблизи целевого отверстия на выходной кромке среднего сечения; ■ – нижний угол целевого отверстия на выходной кромке прикорневого сечения; ▲ – перегородка между верхними целевыми отверстиями во внутреннем канале.

Приведенные на рис. 9 результаты для охлаждаемой лопатки также свидетельствуют о существенном влиянии аксиальной ориентации на изменение величины коэффициента пересчета, которое может достигать 66% и практически совпадать с полученным при колебаниях по первой изгибной форме. Однако, в отличие от колебаний по первой изгибной форме, в данном случае оно достигает максимума при отклонении продольной оси лопатки от направления $\langle 001 \rangle$ на угол α , равный 30° . Вероятность разрушения в той или иной зоне пера охлаждаемой лопатки при колебаниях как по первой

изгибной форме, так и по первой крутильной зависит от кристаллографической ориентации.

Выводы

1. Установлены закономерности влияния кристаллографической ориентации продольной оси монокристаллических лопаток на формирование спектра собственных частот и форм колебаний.

2. Предложен расчетно-экспериментальный метод определения предела выносливости монокристаллических лопаток, применение которого позволяет значительно сократить объем испытаний при одновременном повышении достоверности результатов.

3. Показано, что на предел выносливости монокристаллических лопаток, зависящий от формы их колебаний, существенное влияние оказывает азимутальная ориентация их продольной оси.

Резюме

Із використанням тривимірних моделей монокристалічних робочих лопаток встановлено закономірності впливу кристаллографічної орієнтації осей матеріалу на формування спектра власних частот і форм їх коливань. Запропоновано розрахунково-експериментальний метод визначення границі витривалості монокристалічних лопаток, що дозволить значно скоротити об'єм випробувань за одночасного підвищення вірогідності їх результатів.

1. *Муравченко Ф. М.* Актуальные проблемы динамики прочности и надежности авиадвигателей // *Вібрації в техніці та технологіях*. – 2004. – № 6 (38). – С. 2 – 4.
2. *Скибин В., Солонин В., Дульнев А.* Перспективы развития газотурбинных двигателей // *Газотурбинные технологии*. – 2000. – № 2. – С. 4 – 8.
3. *Шалин Р. Е., Светлов И. Л., Качанов Е. Б. и др.* Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
4. *Ножницкий Ю. А., Голубовский Е. Р.* Монокристаллические рабочие лопатки высокотемпературных турбин перспективных ГТД // *Авиационная техника и технология*. – 2006. – № 9 (35). – С. 117 – 123.
5. *Богуслаев В. А., Муравченко Ф. М., Жеманюк П. Д. и др.* Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. – Запорожье: Изд. ОАО “Мотор Сич”, 2003. – Ч. 2. Лопатки турбины. – 420 с.
6. *Гаврилов С. Н.* Влияние податливости в хвостовом соединении на собственные частоты колебаний рабочих лопаток // *Вібрації в техніці та технологіях*. – 2001. – № 4 (20). – С. 61 – 62.
7. *Придорожный Р. П., Шереметьев А. В., Зиньковский А. П.* Влияние кристаллографической ориентации на спектр собственных частот и форм колебаний монокристаллических рабочих лопаток турбин // *Вестн. двигателестроения*. – 2006. – № 2. – С. 42 – 48.

8. Мельникова Г. В., Шорр Б. Ф., Магеррамова Л. А. и др. Влияние кристаллографической ориентации монокристалла и ее технологического разброса на частотный спектр турбинных лопаток // Авиационная техника и технология. – 2001. – Вып. 26. – С. 140 – 144.
9. Петухов А. Н., Годубовский Е. Р., Басов К. А. Частотные характеристики и формы колебаний монокристаллических образцов и охлаждаемых лопаток турбин с различной кристаллографической ориентацией // Авиационная техника и технология. – 2006. – № 8 (34). – С. 50 – 56.
10. Кривко А. И., Епишин А. И., Светлов И. Л. и др. Упругие свойства монокристаллов никелевых сплавов // Пробл. прочности. – 1988. – № 2. – С. 68 – 75.
11. Придорожный Р. П., Шереметьев А. В. Особенности влияния кристаллографической ориентации на усталостную прочность монокристаллических рабочих лопаток турбин // Авиационная техника и технология. – 2005. – № 10 (26). – С. 55 – 59.

Поступила 25. 10. 2007