

УДК 539.3:621

Ю.С. ВОРОБЬЕВ¹, К.Ю. ДЬЯКОНЕНКО², С.Б. КУЛИШОВ³, А.Н. СКРИЦКИЙ³¹Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАНУ, Харьков, Украина²Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, Украина³ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина**ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ НА КОЛЕБАНИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ ЛОПАТОК ГАЗОВЫХ ТУРБИН С ВИХРЕВОЙ МАТРИЦЕЙ**

Исследуется лопатка с монокристаллической структурой и системой охлаждающих каналов в виде вихревой матрицы. Оценивается влияние изменения направлений кристаллографической ориентации на параметры колебаний – собственные частоты, формы и распределения напряжений. Приведены графические зависимости собственных частот от изменения направлений кристаллографической ориентации материала лопатки. Показано распределение и локализация напряжений при различных формах колебаний лопатки. Локализация напряжений наблюдается не только на входных и выходных кромках, но и на поверхностях охлаждающих каналов и отверстий для выхода газов.

лопатка, охлаждающие каналы, монокристалл, гранецентрированная кубическая решетка, ориентация монокристалла, собственные частоты и формы колебаний, интенсивность напряжений

Введение

Лопатки газовых турбин работают в сложных условиях термомеханического нагружения. Характерным примером является лопатка с охлаждающими каналами в виде вихревой матрицы, выполненная из жаропрочного никелевого сплава, обладающего монокристаллическими свойствами.

Для описания колебаний таких лопаток необходимо использовать трехмерные модели, учитывающие анизотропию материала. Универсальным для описания поведения лопаток является метод конечных элементов. Вопросам влияния монокристаллической структуры на прочность и колебания лопаток посвящен ряд работ [1 – 6]. Однако, комплексный учет сложной геометрической формы охлаждаемых лопаток и анизотропии монокристаллического материала требует дальнейших исследований.

1. Постановка задачи

Рассмотрим колебания охлаждаемой лопатки выполненной из монокристалла никелевого жаропрочного сплава. Охлаждающие каналы выполнены в виде вихревой матрицы (рис. 1).

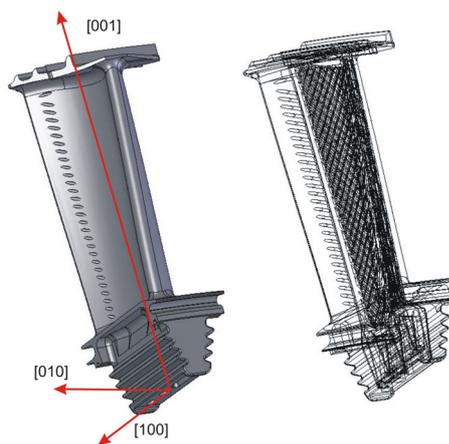


Рис. 1. Геометрия лопатки и схема расположения осей кристаллографической ориентации

Структура кристалла представляет собой гранецентрированную кубическую (ГЦК) решетку. Схематически ее структура представлена на рис. 2.

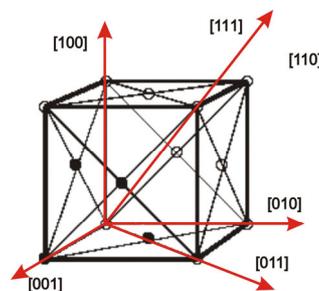


Рис. 2. Структура монокристалла

Главной особенностью такой структуры является то, что при повороте на 90° вокруг любой из своих осей, материал имеет те же свойства, что и до поворота, тогда как поворот на другой угол (не кратный 90°), приводит к изменению упругих свойств.

В произвольной ориентации монокристалла, его матрица податливости заполнена полностью, однако в случае совпадения осей x, y, z с кристаллографическими осями $[100], [010]$ и $[001]$ матрица податливости имеет упрощенный вид:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Таким образом, упругое поведение материала полностью определяется 3-мя независимыми константами – S_{11}, S_{12}, S_{44} . Связь компонент матрицы податливости с техническими упругими постоянными имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{E_x} = \frac{1}{E_y} = \frac{1}{E_z} &= S_{11}; \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} = -\frac{\nu_{yz}}{E_y} = -\frac{\nu_{zx}}{E_z} &= S_{12}; \\ \frac{1}{G_{xy}} = \frac{1}{G_{yz}} = \frac{1}{G_{zx}} &= S_{44}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для определения влияния ориентации монокристалла на параметры колебаний, необходимо провести варьирование аксиальной и азимутальной ориентации. Исходная ориентация принимается таковой, что направление $[001]$ совпадает с осью пера лопатки, $[100]$ – параллельно хвостовику лопатки, а $[010]$ – соответственно перпендикулярно плоскости, образуемой $[001]$ и $[100]$. На рис. 1 показано исходное расположение осей $[010]$ и $[100]$ и их положение после поворота относительно оси $[001]$, т.е. изменения азимутальной ориентации монокристалла лопатки. При изменении аксиальной ориентации аналогичным образом осуществляется поворот вокруг осей $[010]$ и $[100]$. Таким образом, производится

варьирование относительно каждой из трех осей в диапазоне от -45° до $+45^\circ$ с шагом в 5° .

Материал лопатки – жаропрочный никелевый сплав ЖС6Ф. Его упругие константы для холодной ($T_{лон} = 20^\circ\text{C}$) лопатки [7], преобразованные к виду технических упругих констант, составили:

$$\begin{aligned} E &= 1/S_{11} = 139607 \text{ МПа}; \\ \nu &= -E \cdot S_{12} = 0,3833; \\ G &= 1/S_{44} = 129524 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

2. Разработка расчетной модели

Моделирование лопатки осуществляется при помощи метода конечных элементов (МКЭ) в трехмерной постановке. Несмотря на высокое развитие коммерческих программных продуктов, реализующих МКЭ, важнейшим этапом исследований является адаптация программного комплекса к конкретной задаче. В первую очередь, необходимо правильно выбрать конечный элемент (КЭ), на основе которого построить модель, обеспечивающую требуемую точность решения. Чрезвычайная сложность геометрии исключает возможность использования регулярной сетки (из гексаэдров), вследствие чего приходится использовать свободную сетку (из тетраэдров). Для данной лопатки было построено несколько вариантов КЭ моделей, различающихся числом элементов и типом элементов (линейные и квадратичные).

Был проведен анализ сходимости метода расчета с увеличением числа степеней свободы (ЧСС). Результаты расчета модели с наибольшим ЧСС (2 747 526) были приняты за "точное" значение, с которым сравнивались результаты расчета модели с меньшим ЧСС. График изменения относительной погрешности для нижних 10 частот при увеличении числа степеней свободы представлен на рис. 3. Видно, что при достижении ЧСС 1,7 млн, относительная погрешность для 10 нижних частот лежит в пределах 1%, что можно считать удовлетворительным.

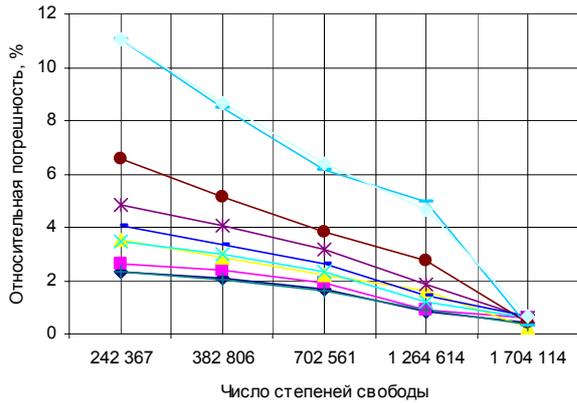


Рис. 3. Сходимость решения (10 низших частот) с увеличением степени дискретизации

3. Анализ численных результатов

Для выявления степени влияния анизотропии материала на собственные частоты, проведено сравнение собственных частот монокристаллической лопатки с собственными частотами лопатки из равноосного (изотропного) материала. Результаты сравнения представлены в табл. 1 и показывают, что различие между частотами изменяется в диапазоне 5 – 50%.

Таблица 1

Сравнение собственных частот колебаний лопатки для поликристаллического и ориентированного монокристаллического материалов

№	Собственные частоты лопатки, Гц		Различие частот δ , %
	Поликристаллический сплав	Монокристаллический сплав	
1	616,48	645,5	4,7
2	1420,8	1565,7	10
3	2079,2	3089,5	48,6
4	3146,3	3453,8	9,8
5	5223,2	6851,3	31,2
6	6492,4	7916,5	21,9
7	7205	8283,5	15
8	8090,2	9127,3	12,8
9	9122	11718	28,4
10	9560,5	11972	25,2

Влияние на собственные частоты изменения азимутальной и аксиальной ориентации монокристалла показано в табл. 2.

Результаты численных исследований влияния

направления КГО на собственные частоты колебаний представлены на графиках (рис. 4 – 7).

Таблица 2.

Изменение собственных частот лопатки при изменении направления КГО относительно каждой из осей

№	Максимальное отклонение частот, %		
	[100]	[010]	[001]
1	25,8	23,4	0,7
2	21,2	11,6	0,6
3	11,2	27,3	0,45
4	17,2	15,7	0,2
5	5,6	10,8	0,9
6	4,5	5,8	0,9
7	14,7	8,5	0,1
8	17	15,7	1,6
9	1,4	7,1	4
10	1,2	5,6	0,8

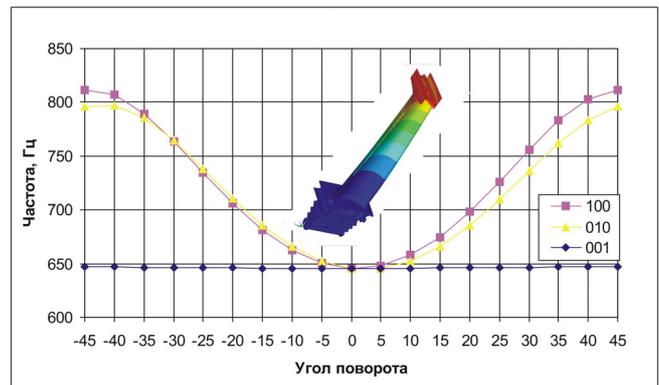


Рис. 4. Изменение первой собственной частоты в зависимости от поворота направлений КГО относительно трех осей ([100], [010], [001])

Характер изменения частот зависит от формы колебаний. Для преимущественно изгибных форм колебаний отклонение направления КГО от исходного положения приводит к увеличению собственных частот (рис. 4). При этом минимальное значение частоты соответствует исходному положению.

При преимущественно крутильной форме колебаний происходит снижение собственных частот при отклонении КГО от исходной (рис. 5).

Для более сложных форм, например преимущественно изгибно-крутильных форм с одним и двумя узлами, наблюдаются и более сложные зависимости частоты от угла направления КГО (рис. 6, 7).

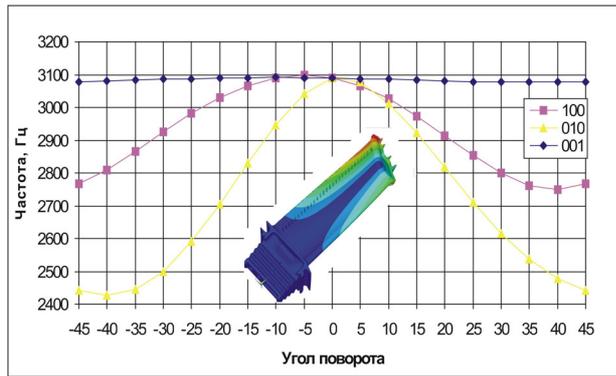


Рис. 5. Изменение третьей собственной частоты в зависимости от поворота направлений КГО относительно трех осей ([100], [010], [001])

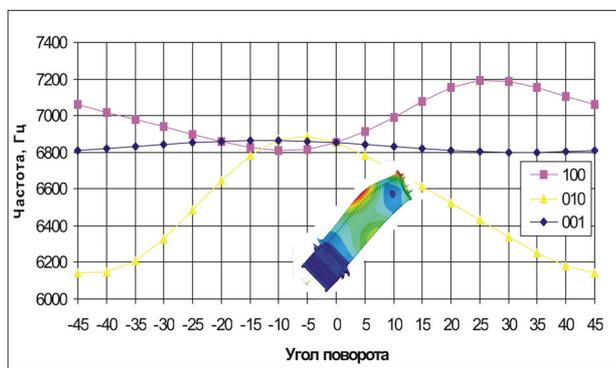


Рис. 6. Изменение пятой собственной частоты в зависимости от поворота направлений КГО относительно трех осей ([100], [010], [001])

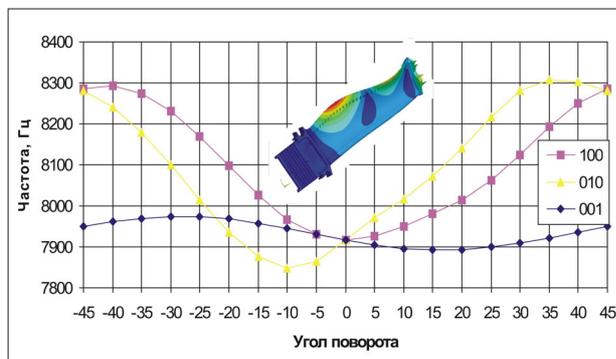


Рис. 7. Изменение шестой собственной частоты в зависимости от поворота направлений КГО относительно трех осей ([100], [010], [001])

На графиках видно, что изменение угла азимутальной ориентации меняет собственные частоты незначительно.

Гораздо более существенное изменение собственных частот вызывает изменение аксиальной ориентации (повороты относительно осей [100] и [010]).

Распределение интенсивности динамических напряжений зависит от форм колебаний. Преимущественно изгибные формы колебаний сопровождаются, как правило, локализациями напряжений на выходной и входной кромках, в хвостовике, а также – вокруг выходных отверстий охлаждающих каналов (рис. 8).

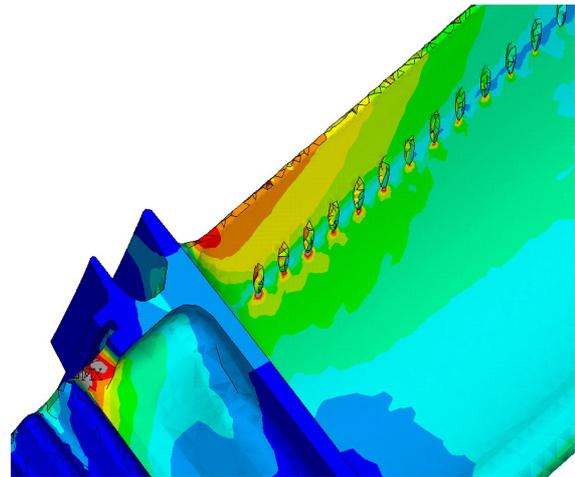


Рис. 8. Локализации интенсивностей напряжений на второй форме колебаний (преимущественно изгибной), $f=1566$ Гц

На рис. 9 представлены зоны локализации напряжений для разных форм колебаний.

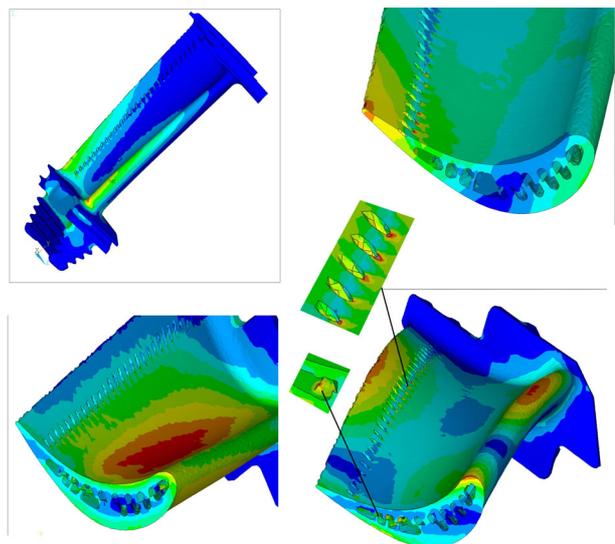


Рис. 9. Локализации интенсивностей напряжений на различных формах колебаний лопатки.

Особо следует отметить наличие зон локализации напряжений на внутренней поверхности лопатки.

ки - на охлаждающих каналах и на выходных отверстиях, расположенных на корыте лопатки. В зависимости от формы колебаний, области локализации напряжений смещаются выше или ниже вдоль оси лопатки, а также могут смещаться по профилю.

Выводы

Использованные численные модели позволяют достаточно точно получить собственные частоты и формы колебаний и выявить влияние на них кристаллографической ориентации для лопатки с системой охлаждающих каналов в виде вихревой матрицы. Распределения относительных напряжений показывают опасные области.

При наличии экспериментального значения напряжений в некоторой точке лопатки, из полученных расчетных данных может быть легко представлена полная картина напряженного состояния. Особенно актуальным это является для охлаждаемых лопаток, в частности, лопаток с вихревой матрицей, для которой значительная часть поверхности остается недоступной для тензометрирования.

Рассматриваемая охлаждаемая лопатка в целом спроектирована достаточно удачно, так что в рассмотренном частотном диапазоне вибрационные напряжения распределены достаточно равномерно. Для таких лопаток остаются актуальными вопросы учета температурной и ростовой неоднородностей, нагрузок и других воздействий.

Литература

1. Ножницкий Ю.А., Голубовский Е.Р. Монокристаллические рабочие лопатки высокотемпературных турбин перспективных ГТД // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 9 (35). – С. 117-123.

2. Голубовский Е.Р., Светлов И.Л., Хвацкий К.К. Закономерности изменения аксиальной и азимутальной анизотропии прочностных характеристик монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов для лопатки ГТД // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 10 (26). – С. 50-54.

3. Петухов А.Н., Голубовский Е.Р., Басов К.А. Частотные характеристики и формы колебаний монокристаллических образцов и охлаждаемых лопаток турбин с различной кристаллографической ориентацией // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 8 (34). – С. 50-56.

4. Придорожный Р.П., Шереметьев А.В. Особенности влияния кристаллографической ориентации на усталостную прочность монокристаллических рабочих лопаток турбин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 10 (26). – С. 55-59.

5. Мельникова Г.В., Магеррамова Л.А., Протопопова Д.А. Влияние кристаллографической ориентации монокристалла и ее технологического разброса на частотный спектр турбинных лопаток // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2001. – Вып. 26. – С. 140-144.

6. Температурно-ориентационная зависимость характеристик кратковременной прочности, модуля Юнга и коэффициента линейного расширения монокристаллов сплава ЖС6Ф / И.Л. Светлов, Н.Н. Суханов, А.И. Кривко и др. // *Проблемы прочности*. – 1987. – № 1. – С. 51-56.

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

Поступила в редакцию 26.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Елифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.