

УДК 539.3 : 621

Ю.С. ВОРОБЬЕВ<sup>1</sup>, К.Ю. ДЬЯКОНЕНКО<sup>2</sup>, С.Б. КУЛИШОВ<sup>3</sup>, А.Н. СКРИЦКИЙ<sup>3</sup><sup>1</sup>*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАНУ, Харьков, Украина*<sup>2</sup>*Национальный технический университет «ХПИ», Украина*<sup>3</sup>*ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Украина*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ОХЛАЖДАЕМЫХ ЛОПАТОК ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Проводится численный анализ колебаний охлаждаемой турбинной лопатки. Лопатка обладает монокристаллической структурой и системой охлаждающих каналов в виде вихревой матрицы. Оценивается влияние азимутальной ориентации на параметры колебаний – собственные частоты, формы и распределения напряжений.

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

### Введение

Среди многочисленных вопросов газотурбинного двигателестроения особенно остро выделяется вопрос анализа колебаний лопаток, работающих в газовом потоке высокой температуры. Такие лопатки часто выполняются с охлаждающими каналами сложной формы. Особо сложной формой обладают каналы, образующие вихревую матрицу. Кроме того, с физической точки зрения произошло усложнение структуры, связанное с использованием анизотропных материалов, в частности монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов. Для описания колебаний таких лопаток необходимо использовать трехмерные модели, учитывающие анизотропию материала.

На сегодняшний день универсальным для описания поведения лопаток является метод конечных элементов (МКЭ). 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. Кроме того, необходимо учитывать неоднородности различного характера (температурную и пр.).

### Постановка задачи

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

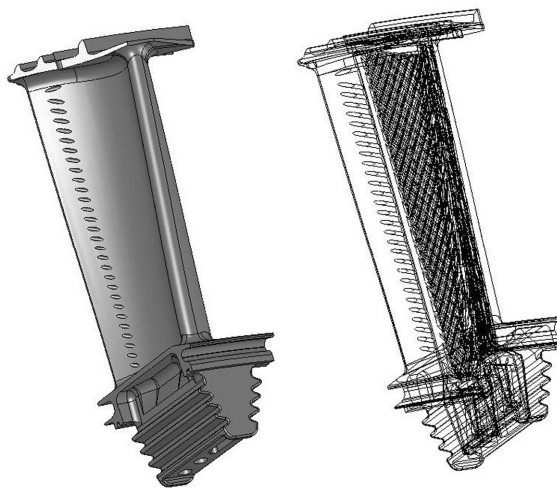


Рис. 1. Общий вид лопатки  
и схема охлаждающих каналов

Исходная ориентация монокристалла –  $\langle 001 \rangle$ . Проводится варьирование азимутальной ориентации с целью выявления ее влияния на параметры колебаний. Так как структура кристалла представляет собой гранецентрированную кубическую (ГЦК) ре-

шетку, то достаточно рассмотреть диапазон угла  $90^\circ$ . Исходная ориентация была таковой, что направление  $[001]$  совпадало с осью пера лопатки,  $[100]$  – параллельно хвостовику лопатки, а  $[010]$  – соответственно перпендикулярно плоскости, образуемой  $[001]$  и  $[100]$  (рис. 2). Азимутальное направление (угол  $\varphi$  на рис. 2) варьировалось в пределах от  $-45^\circ$  до  $45^\circ$ .

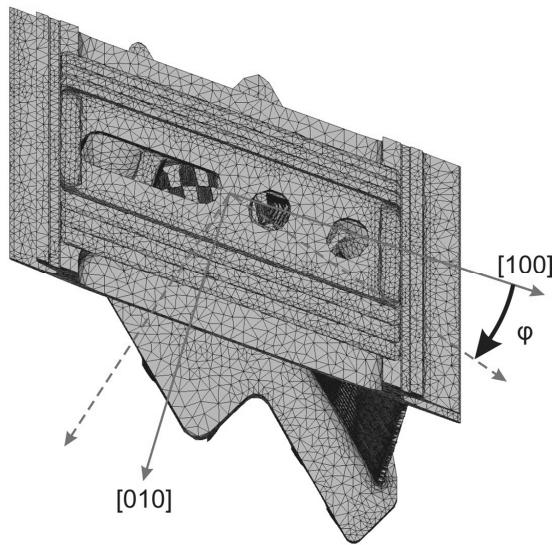


Рис. 2. Конечноэлементная модель лопатки. Схема варьирования угла азимутальной ориентации  $\varphi$

Материал лопатки – жаропрочный никелевый сплав ЖС6Ф. Его упругие константы для холодной ( $20^\circ\text{C}$ ) лопатки [7], преобразованные к виду технических упругих констант, составили:  $E = 139607$  МПа,  $\nu = 0,3833$ ,  $G = 129524$  МПа. Плотность была

принята равной  $\rho = 7810$  кг/м<sup>3</sup>. Рационально задавать свойства ГЦК-решетки, указав ортотропные свойства материала. Модули упругости, коэффициенты Пуассона и модули сдвига задаются одинаковыми в трех направлениях, но независимыми друг от друга. Для этого не обязательно использовать специальные анизотропные конечные элементы, а достаточно обычных элементов, поддерживающих ортотропию.

### Анализ численных результатов

Были проведены численные исследования влияния азимутальной ориентации на собственные частоты колебаний, результаты которых представлены в табл. 1. Видно, что изменение угла азимутальной ориентации меняет собственные частоты незначительно. Однако даже это незначительное влияние имеет ряд своих закономерностей. Формы колебаний имеют сложный пространственный характер, но в них просматриваются простые составляющие – изгибные, крутильные, продольные. Для преимущественно изгибных колебаний лопатки отклонение азимутальной ориентации от исходной, как правило, приводит к увеличению собственной частоты (рис. 3), тогда как для преимущественно крутильных колебаний наблюдается обратная тенденция – отклонение приводит к уменьшению собственных частот (рис. 4).

Таблица 1

Собственные частоты в зависимости от угла азимутальной ориентации (Гц)

	$-45^\circ$	$-30^\circ$	$-20^\circ$	$-10^\circ$	$0^\circ$	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$
1	643,65	643,35	642,87	642,22	642,17	642,42	642,87	643,35	643,65
2	1560,9	1560,9	1560,6	1560,2	1559,9	1560,1	1560,6	1560,9	1560,9
3	3078,1	3077,2	3080,4	3090,4	3089,1	3085,1	3080,4	3077,2	3078,1
4	3445,1	3443,4	3440,5	3437,5	3436,8	3437,9	3440,5	3443,4	3445,1
5	6797,1	6785,9	6796,7	6846,8	6835,7	6816,2	6796,7	6785,9	6797,1
6	7954,6	7917,7	7901,2	7942,5	7916,9	7900,7	7901,2	7917,7	7954,6
7	8280,2	8282,5	8278,9	8265,2	8266,7	8272,3	8278,9	8282,5	8280,2
8	9035	9006,3	9025,2	9141,3	9111,4	9065,8	9025,2	9006,3	9035
9	11485	11438	11518	11856	11775	11650	11518	11438	11485
10	12122	12084	12036	12011	11998	11999	12036	12084	12122

Для более сложных форм, например, преимущественно изгибно-крутильной формы с двумя узлами, наблюдаются и более сложные зависимости частоты от угла азимутальной ориентации (рис. 5).



Рис. 3. Изменение первой собственной частоты в зависимости от изменения угла азимутальной ориентации. Преимущественно изгибные колебания



Рис. 4. Изменение третьей собственной частоты в зависимости от изменения угла азимутальной ориентации (преимущественно крутильные колебания)

При изменении угла азимутальной ориентации формы колебаний изменяются слабо.

В зависимости от формы колебаний локализация напряжений возникает в различных зонах: на поверхности спинки (особенно у основания пера), на входной кромке лопатки, а также в замковом соединении, на внутренних поверхностях лопатки (стенки охлаждающих каналов), вокруг выводящих охлаждающую жидкость отверстий.

На рис. 6 представлена пространственная форма колебаний лопатки – преимущественно изгибно-

крутильная. Видны зоны локализации интенсивности напряжений на спинке ближе к выходной кромке и в замковом соединении.



Рис. 5. Изменение шестой собственной частоты в зависимости от изменения угла азимутальной ориентации. Преимущественно изгибно-крутильные колебания



Рис. 6. Форма колебаний с наложенными полями распределений интенсивности напряжений (преимущественно изгибно-крутильные колебания)

На рис. 7 представлен фрагмент лопатки с зонами локализации напряжений на поверхностях охлаждающих каналов. Следует обратить внимание на отверстия выхода охлаждающей жидкости. На поверхности этих отверстий также наблюдаются локализации напряжений, что может привести к образованию трещин.

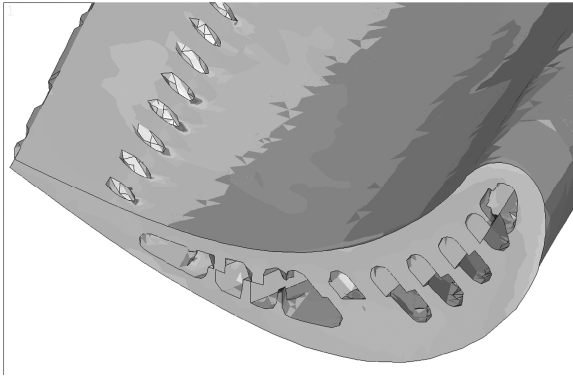


Рис. 7. Распределение интенсивности напряжений на седьмой форме колебаний на пере и внутри лопатки

### Выводы

Использованная расчетная схема позволяет выявить влияние кристаллографической ориентации на параметры колебаний и появление зон локализации напряжений в лопатке с системой охлаждающих каналов в виде вихревой матрицы. Рассматриваемая лопатка в целом спроектирована таким образом, что в широком частотном диапазоне вибрационные напряжения распределены достаточно равномерно. В то же время результаты исследований позволили выявить зоны локализации напряжений и показывают необходимость поиска более рационального моделирования монокристаллических лопаток с охлаждающими каналами, 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: Научн.-техн. журн.* – 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: Научн.-техн. журн.* – 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: Научн.-техн. журн.* – 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: Научн.-техн. журн.* – 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: Сб. научн.-техн. тр. – X.: ХАИ.* – 2001. – Вып. 26. Тепловые двигатели и энергоустановки. – С. 140-144.

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

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

*Поступила в редакцию 25.05.2007*

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