

УДК 539.3

# АНАЛИЗ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛОПАТОК СОВРЕМЕННЫХ ГТД

*У роботі проведено аналіз впливу властивостей матеріалу та орієнтації кристалографічних осей на спектр власних частот, форм і розподіл відносних напружень при коливаннях робочих монокристалічних охолоджуваних і неохолоджуваних лопаток*

*Ключові слова: монокристалічні лопатки, кристалографічна орієнтація, коливання*

*В работе проведен анализ влияния свойств материала и ориентации кристаллографических осей на спектр собственных частот, форм и распределение относительных напряжений при колебаниях рабочих монокристаллических охлаждаемых и неохлаждаемых лопаток*

*Ключевые слова: монокристаллическая лопатка, кристаллографическая ориентация, колебания*

*The work presents an analysis of influence material properties and orientation of crystallography axes is conducted on the spectrum of natural frequencies, forms and distributing of stress intensity on the vibrations of gas-turbine single-crystal cooled and uncooled blades*

*Key words: single-crystal blades, crystallography orientation, vibrations*

**Ю.С. Воробьев**

Доктор технических наук, профессор, заведующий отделом\*

Контактный тел.: (0572) 94-15-24, 349-47-73

E-mail: vorobiev@ipmach.kharkov.ua

**М.А. Чугай**

Кандидат технических наук, научный сотрудник\*

Контактный тел.: (0572) 94-15-24, 349-47-73

E-mail: chugay@ipmach.kharkov.ua

**К.Ю. Дьяконенко**

Инженер\*

Контактный тел.: (0572) 94-15-24

E-mail: vorobiev@ipmach.kharkov.ua

\*Отдел нестационарных механических процессов

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного

НАН Украины

ул. Пожарского, 2/10, г. Харьков, Украина, 61046

**С.Б. Кулишов**

Кандидат технических наук, зам. генерального

конструктора по новой технике\*\*

Контактный тел.: (0512) 49-74-21

E-mail: spe@machproekt.nikolaev.ua

**А.Н. Скрицкий**

Заведующий отделом\*\*

Контактный тел.: (0512) 49-74-21

E-mail: spe@machproekt.nikolaev.ua

\*\*ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект»,

пр. Октябрьский, 42а, г. Николаев, Украина, 54018

## 1. Введение

Современные тенденции совершенствования ГТД связаны с ростом параметров потока рабочего газа. Лопаточный аппарат при этом испытывает воздействие все более высоких интенсивностей динамических нагрузок и температурных полей. Поэтому рабочие лопатки не только первой, но и последующих ступеней газовых турбин изготавливают из жаропрочных монокристаллических сплавов.

Первые ступени газовой турбины имеют охлаждаемые лопатки с аксиальной ориентацией монокристаллического материала [001]. Это связано с обеспечением их статической прочности в условиях высоких температур и их высоких градиентов [1]. В таких лопатках локализация вибрационных напряжений часто возникает на внутренней поверхности охлаждаемых каналов и представляет большую опасность.

Для остальных ступеней газовых турбин используются, как правило, неохлаждаемые монокристаллические лопатки. Для них выбор аксиальной ориентации монокристаллического материала неоднозначен. При аксиальной ориентации [001] продольный модуль упругости является минимальным, но жесткость на кручение максимальной. Максимальный продольный модуль упругости достигается при аксиальной ориентации монокристаллического материала [111].

Выбор рациональной ориентации монокристаллического материала зависит от геометрической формы лопаток, форм их колебаний и распределения вибрационных напряжений, представляющих наибольшую опасность [1-3]. Без детального анализа вибрационных характеристик монокристаллических лопаток и особенностей распределения относительных напряжений с учетом геометрической формы, температурных полей и центробежных сил невозможно сделать обоснованные выводы о выборе рациональных конструктив-

ных параметров и ориентации монокристаллического материала конкретных конструкций.

## 2. Расчетные схемы и результаты исследований

Рассматриваются особенности колебаний монокристаллической лопатки первой ступени со сложной вихревой системой охлаждения и каналами для выхода охлаждаемого воздуха. На рис. 1 показан общий вид лопатки и матрица вихревой системы охлаждения.

Проведены исследования сходимости результатов для серии расчетных конечно-элементных моделей с различными уровнями дискретизации [4]. Выбранная расчетная схема обеспечивает относительную ошибку в определении собственных частот порядка 1% при 1,7 млн. степеней свободы, а также достаточно ясную картину полей относительных напряжений с высокими их градиентами [4, 5].

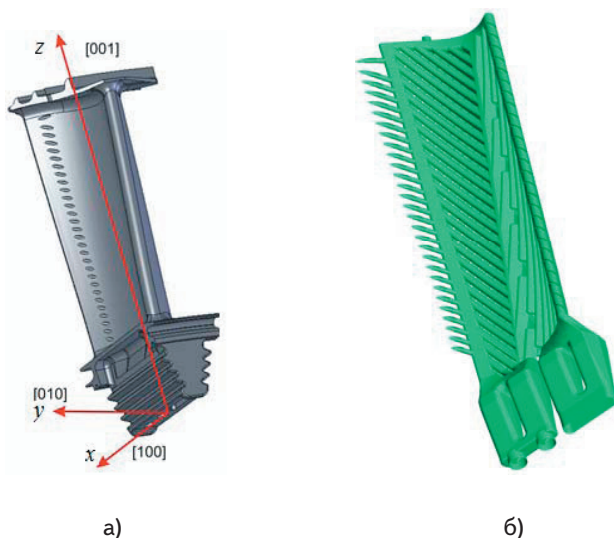


Рис. 1. Охлаждаемая лопатка с обозначением монокристаллических направлений (а) и ее система охлаждения в виде вихревой матрицы (б)

Расчетная схема обеспечивает хорошее совпадение расчетных частот с известными экспериментальными данными (табл. 1).

Таблица 1

Расчетные и экспериментальные значения собственных частот колебаний лопатки из изотропного материала

№ частоты	Форма колебаний	Значение частот, Гц	
		Расчетное	Экспериментальное
1	1-я изгибная	737,89	740-780
2	2-я изгибная	1712,5	-
3	1-я крутильная	2551,6	2545-2740
4	3-я изгибная	3789,5	-

Проведены исследования влияния отклонения ориентации кристаллографических осей (КГО) монокристаллического материала от первоначальной, совпадающей с глобальной системой координат ло-

патки (рис. 1) для первых 10 собственных частот. Для примера на рис. 2 показано влияние углов отклонения КГО на 6 собственную частоту. Показано, что наибольшее влияние на собственные частоты оказывает отклонение аксиальной ориентации КГО. При этом максимальное влияние возникает при повороте КГО вокруг направления [010] и достигает 27°. Отклонения азимутальной ориентации КГО оказывает значительно меньшее влияние на собственные частоты лопатки. Эти результаты соответствуют данным, полученным в работах [1, 3] для монокристаллических лопаток с другими системами охлаждения.

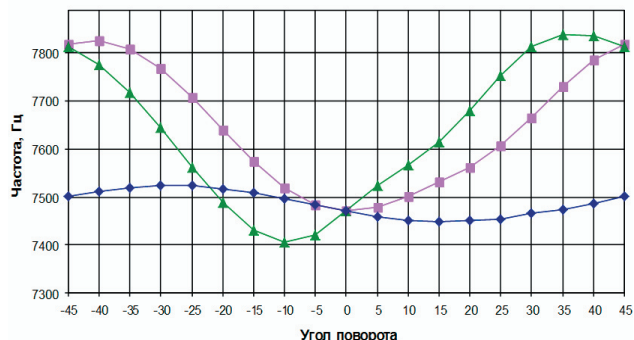


Рис. 2. Зависимость изменения шестой собственной частоты монокристаллической лопатки от угла поворота осей лопатки относительно направлений КГО монокристалла [100] (■), [010](▲), [001](◆)

Из результатов подобных исследований можно сделать вывод, что при изготовлении серии монокристаллических лопаток для ограничения разброса их собственных частот не более 10% следует обеспечить соблюдение аксиальной ориентации КГО с точностью до 10-15° [1-3]. Аксиальная КГО [001] должна находиться в конусе с эллиптическим сечением параллельным плоскости ху, а углы отклонения КГО изменяются от 10° до 15°.

Ограничение на отклонение азимутальной ориентации менее жесткие [2, 3].

Для жестких охлаждаемых лопаток повышение температуры вызывает снижение собственных частот более чем на 10%. Повышение собственных частот таких лопаток под действием центробежных сил заметно меньше и на рабочих режимах наблюдается снижение частот охлаждаемых лопаток.

Большой интерес представляют результаты анализа форм колебаний и распределение напряжений. Сложность геометрической формы охлаждаемых и неохлаждаемых лопаток обуславливает и сложность форм их колебаний [4-6]. Но наибольший интерес вызывает анализ распределения относительных интенсивностей напряжений. Результаты этих исследований показывают, что зоны локализации относительных напряжений расположены не только на поверхности лопаток, но и на внутренней поверхности охлаждающих каналов и отверстий для выхода охлаждающего воздуха (рис. 3).

Это обстоятельство следует учитывать, т.к. возможное возникновение повреждений в зонах, недоступных визуальному контролю и тензометрическим исследованиям.

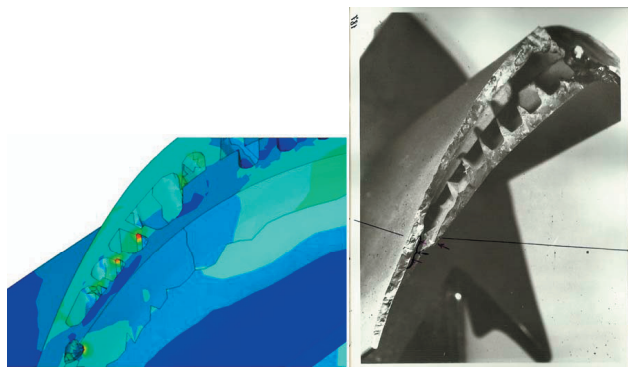


Рис. 3. Зоны локализации относительных напряжений при четвертой форме колебаний охлаждаемой лопатки (а) и разрушение ее при лабораторных испытаниях (б)

Примеры расположения зоны локализации относительных интенсивностей напряжений представлены на рис. 4.

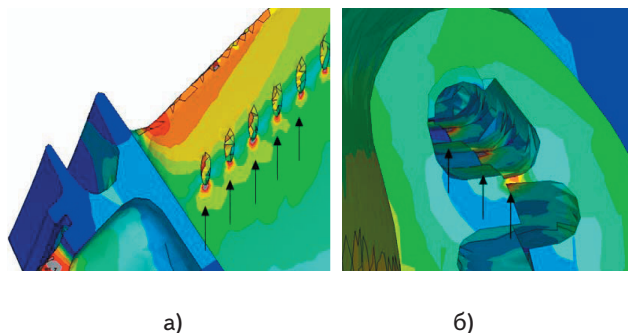


Рис. 4. Зоны локализации напряжений при первой ( $f_1 = 633,2$  Гц) (а) и третьей ( $f_3 = 2626$  Гц) (б) собственных формах колебаний лопатки

Они объясняют характер и места повреждений и разрушений лопаток, обнаруженные при лабораторных испытаниях лопаток на ГП НПКГ «Зоря» - «Машпроект» (рис. 3,б, 5).

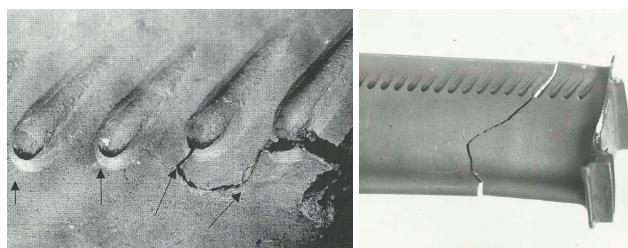


Рис. 5. Зоны зарождения трещин и характерные разрушения лопатки, которые наблюдались при лабораторных исследованиях

В работах [2, 3, 7] отмечалось, что в монокристаллических лопатках распространение магистральной трещины соответствует расположению КГО. Но также известно, что при соблюдении основных тенденций конкретное распространение ряда трещин носит более сложный характер.

Неохлаждаемые лопатки изготавливаются из поликристаллических сплавов или монокристаллических

ских с расположением материала с аксиальными ориентациями [001] и [111].

Изменение собственных частот для лопаток из различных материалов представлено в табл. 2. Там же приведено сопоставление расчетных частот с экспериментальными данными.

Таблица 2

Сравнительная характеристика собственных частот (Гц) для поликристаллической и монокристаллических лопаток с различной КГО

№ п/п	Поликристаллическая лопатка		Монокристаллический материал с КГО		
	Расчет	Эксперимент	[001]		[111]
			Расчет	Эксперимент	Расчет
1	848	828-838	718,6	699-780	901,8
2	1519		1727	1689-2782	1808
3	2452		3007	2682-3062	3355
4	3223		3379	3258-3307	3913,9
5	4697		5826		6131
6	5997		7110		7453
7	8284		9525		10285
8	8447		10143		11080
9	9553		11323		12256
10	10642		11507		13610

На рис. 6, 7 приведено в качестве примера формы перемещений и распределения относительных напряжений при колебаниях по седьмой форме колебаний лопаток из разных материалов: поликристаллических, монокристаллических с КГО [001] и монокристаллических с КГО [111]. Видно, что наибольшие изменения происходят с полями распределения относительных напряжений. Причем расположение зон наибольших напряжений заметно меняется. Подобный анализ позволяет получить данные для рационального выбора материала лопаток.

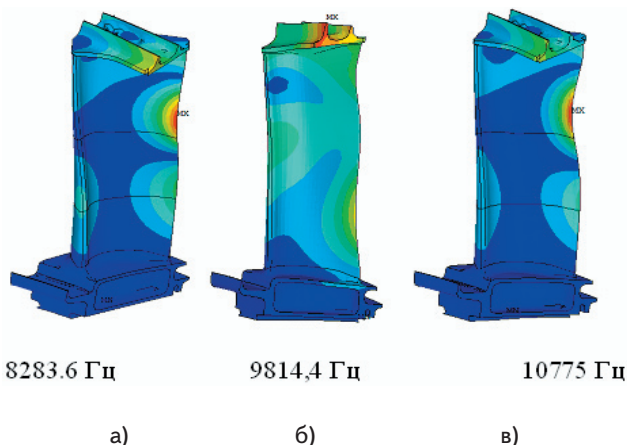
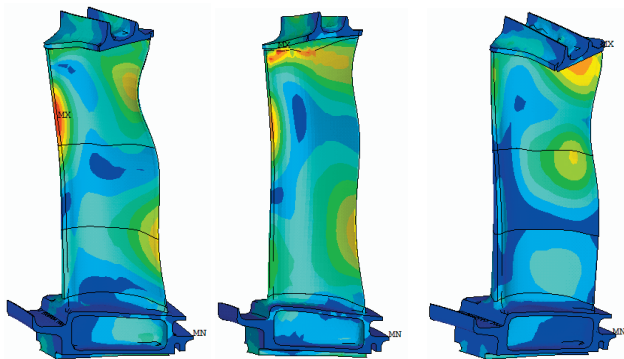


Рис. 6. Поля перемещений на 7-й форме колебаний лопаток: поликристаллической (а), монокристаллической с КГО [001] (б) и монокристаллической с КГО [111] (в)



а) б) в)

Рис. 7. Поля относительных интенсивностей напряжений на 7-й форме колебаний лопаток: поликристаллической (а), монокристаллической с КГО [001] (б) и монокристаллической с КГО [111] (в)

В результате расчетов, показывающих влияние материала лопаток на спектр собственных частот, видно, что использование монокристаллического материала с КГО [001] вместо поликристаллического материала вызывает повышение собственных частот в зависимости от формы колебаний на 6-26 %, причем наибольшее влияние наблюдается на преимущественно крутильных формах.

Использование вместо поликристаллического материала монокристаллического с КГО [111] приводит к еще большему влиянию на собственные частоты и достигает 30 %. При этом переход от монокристаллического материала с КГО [001] к материалу с ориентацией [111] меньше влияет на крутильные частоты (1,8-6,8%) и больше на преимущественно изгибные и сложные (4,7-14%). Это влияние вызвано тем, что при ориентации [001] в колебательной системе возрастает крутильная жесткость, а при ориентации [111]

– модуль упругости  $E_z$  и, соответственно, жесткость на изгиб.

### Выводы

Собственные частоты колебаний лопаток из монокристаллического материала заметно выше, чем для лопаток из поликристаллического материала. При переходе от поликристаллического материала к монокристаллическому наблюдается наибольший рост преимущественно крутильных частот (до 26%) с КГО [001]. Наибольшее повышение частот вызывает использование монокристаллического материала с КГО [111] (до 30%).

Для обеспечения требований к допустимому разбросу собственных частот монокристаллических лопаток при их изготовлении следует контролировать углы отклонения аксиальной ориентации КГО.

Температура больше влияет на собственные частоты жестких охлаждаемых лопаток, чем центробежные силы, и на рабочих режимах собственные частоты таких лопаток снижаются.

Следует учитывать опасность возникновения зон локализации и повышения относительных вибрационных напряжений на внутренней поверхности охлаждающих каналов и отверстий для выхода охлаждающего воздуха, что ведет к повреждениям в местах, недоступных для визуального контроля.

Магистральные трещины в монокристаллических лопатках распространяются преимущественно вдоль кристаллографических осей, хотя распространение конкретных трещин может иметь более сложный характер.

Анализ особенностей колебаний монокристаллических лопаток является достаточно сложным и требует детальнейших исследований.

### Литература

1. Придорожный, Р.П. Влияние кристаллографической ориентации на спектр собственных частот и форм колебаний монокристаллических рабочих лопаток турбин [Текст] / Р.П. Придорожный, А.В. Шереметьев, А.П. Зинковский // Вестник двигателестроения. – 2006. – №2. – С.42-48.
2. Мельникова, Г.В. Влияние кристаллографической ориентации монокристалла и ее технологического разброса на частотный спектр турбинных лопаток [Текст] / Г.В. Мельникова, Б.Ф. Шорр // Авиационно-космическая техника и технология. – 2001. – №26. – С. 140-144.
3. Ножницкий, Ю.А. О прочностной надежности монокристаллических рабочих лопаток высокотемпературных турбин перспективных ГТД [Текст] / Ю.А. Ножницкий, Е.Р. Голубовский // Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования. Труды ЦКТИ. – СПб, 2009. – Вып. 296. – С. 74-82.
4. Анализ локализации напряжений при колебаниях лопаточного аппарата турбомашин [Текст] / Ю.С. Воробьев, К.Ю. Дьяконенко, В.Н. Романенко, М.А. Чугай // Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования: Труды ЦКТИ. – СПб, 2009. – Вып. 296. – С. 282-306.
5. Особенности колебаний лопаточного аппарата ГТД с учетом распределения и локализации напряжений [Текст] / Ю.С. Воробьев, М.А. Чугай, К.Ю. Дьяконенко, В.Н. Романенко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. - 2009. – №4/5 (40) – С. 19–24.
6. Анализ локализации напряжений при колебаниях рабочих колес и охлаждаемых лопаток ГТД [Текст] / Ю.С. Воробьев, К.Ю. Дьяконенко, С.Б. Кулишов, А.Н. Скрицкий // Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – №35 – С. 29-43.
7. Воробьев, Ю.С. Особенности распределения вибрационных напряжений в монокристаллических лопатках с повреждениями [Текст] / Ю.С. Воробьев, М.А. Чугай // Авиационно - космическая техника и технология. – 2011. – №10(87).- С. 123-126.